

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO 356 EN
MOLDE PERMANENTE VACIADO POR GRAVEDAD”**

POR

ING. FERMÍN MEDINA ORTÍZ

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO 356 EN
MOLDE PERMANENTE VACIADO POR GRAVEDAD”**

POR

ING. FERMÍN MEDINA ORTÍZ

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO DICIEMBRE, 2018

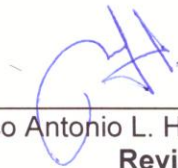
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Optimización del proceso de fundición de aluminio 356 en molde permanente vaciado por gravedad" realizada por el alumno **Fermín medina Ortíz**, con número de matrícula **1880634**, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

EL COMITÉ DE TESIS



Dr. Arturo Juárez Hernández
Director



Dr. Marco Antonio L. Hernández Rodríguez
Revisor



Dr. Martín Herrera Trejo
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado debido a la necesidad de resolver un problema del contacto de piezas metálicas con alimentos, la empresa Fundición Torrey presentaba problemas de porosidad en la fabricación de una pieza de aleación de Aluminio 356 que forma parte de la máquina rebanadora y ésta se encuentra en contacto con los alimentos, así se llevó a cabo una serie de análisis a través de las técnicas de caracterización como lo son la Estereoscopía, Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Refinamiento de Grano y aplicando una metodología experimental para lograr determinar la causa-raíz del problema.

Se hicieron pruebas mejorando la secuencia del proceso, así como los tiempos, las temperaturas y prácticas de limpieza del metal líquido. Se desarrollaron pruebas de control de calidad para verificar el correcto tratamiento del metal.

Por otra parte, también se realizaron estudios a través de software de simulación de llenado de piezas de fundición llamado Solidcast, para conocer el comportamiento que toma el Aluminio a temperaturas de 720°C en moldes metálicos.

Por último, se plantea una optimización del sistema de llenado y es manufacturado en molde permanente con el uso de herramientas CAD CAM.

DEDICATORIA

A mis padres Luzma Ortiz Barreto y Julian Medina Rodriguez

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como el desarrollo de una tesis es inevitable que te ataque un muy humano egocentrismo que te lleva a concentrar la mayor parte del mérito en el aporte que has hecho. Sin embargo, el análisis objetivo te muestra inmediatamente que la magnitud de ese aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con aquellas personas, expresándoles mis agradecimientos.

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por haberme permitido vivir hasta este día, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Doy mil gracias a la apreciable y generosa señora Lulú por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida profesional y personal como guía espiritual y psicóloga personal. Por indicarme el sendero a seguir en momentos de debilidad, por ser mi luz en esos momentos de obscuridad y soledad, por ser mi consejera en condiciones adversas, por ser mi fortaleza muchas gracias.

Gracias a mi compañera de vida, mi esposa Jesica Sánchez por la ayuda que me ha brindado, ha sido sumamente importante, estuvo a mi lado inclusive en los momentos y situaciones más tormentosas, siempre ayudándome. No fue sencillo culminar con éxito este proyecto, sin embargo, siempre ha sido muy motivadora y esperanzadora, siempre diciéndome que lo lograría. Me ha ayudado hasta donde le es posible, incluso más que eso. Muchas gracias, amor.

Especial reconocimiento merecen mis padres Julián Medina y Lúzma Ortiz por apoyarme en todo momento, por todo ese gran apoyo brindado a lo largo de

mi vida, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación de calidad, por darme la oportunidad de estudiar ésta carrera, sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir y por promover el desarrollo y la unión familiar en nuestra familia.

Quisiera ser extensiva mi gratitud a mi hermano Gerzón Medina por ser parte importante de mi vida, por apoyarme en aquellos momentos de necesidad, por ayudar a la unión familiar. A ti por llenar mi vida de grandes momentos de alegría que hemos compartido juntos. De ante mano muchas gracias hermano, eres el mejor.

A mis abuelos Juventina Barreto y Celestino Ortiz por ser pieza importante de la unión familiar, por haber creído en mí, por motivarme e incentivarme a seguir estudiando y superarme profesionalmente cada día más. Por el aliento y apoyo moral con sus fantásticas historias y recuerdos de experiencias que te hacen reflexionar, valorar y convertirte en una mejor persona todos los días. Frase alentadora que nunca voy a olvidar con la que me motivaban en los días de mucha presión y trabajo; “No dejes para mañana lo que puedas hacer hoy”. Muchas gracias queridos abuelos.

Hago extensivo el reconocimiento a mis apreciables primos: Cynthia Ortiz, Michel Ortiz, Abraham Ortiz y Jonathan Ortiz por ser un excelente ejemplo de desarrollo profesional a seguir, por haber compartido conmigo conocimientos y experiencias que motivan a seguir creciendo profesionalmente. Gracias por su apoyo, unidos hacemos una mejor familia.

Al resto de mi familia; tíos, tías, primos y primas cercanos y lejanos, por igual a todos muchas gracias por el apoyo incondicional y moral, por ese empujoncito verbal, felicitaciones, consejos y por confiar en mí.

Debo agradecer de manera especial y sincera a mi director de tesis el Dr. Arturo Juárez Hernández por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable. Las ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación. Le agradezco

también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

A la empresa FUNDICION TORREY por la oportunidad brindada en la realización de este trabajo.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento al Dr. Roberto Benavides, al Dr. Marco Antonio Loudovic y al M.C. Juan Wilfrano por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia que hizo que nuestras siempre acaloradas discusiones redundaran benéficamente tanto a nivel científico como personal. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado y, además, ha significado el surgimiento de una sólida amistad.

A mi círculo de amigos Denis, Andrea, Tatiana, Victor, Salomón, Carlos y Juan por la confianza que en mí depositaron y por creer en mí, por todos los momentos que pasamos juntos, por las tareas y proyectos que juntos realizábamos y por todas las veces que a mí me explicaron, un gran equipo de estudio gracias, gracias por su amistad, sinceridad, apoyo y por haber hecho de mi etapa de maestría un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

Al resto de mis excompañeros de generación por experiencias vividas y trabajos juntos realizados.

Para aquellos amigos que han compartido conmigo los “ires y venires” en el plano personal durante ésta larga estancia en la hermosa Ciudad de Monterrey, Nuevo León.

¡Muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
TABLA DE CONTENIDO	x
OBJETIVO	xiii
OBJETIVOS PARTICULARES	xiii
HIPÓTESIS.....	xiv
1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	15
2. CAPÍTULO II ANTECEDENTES	18
3. CAPÍTULO III REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Aluminio y sus aleaciones.....	19
3.1.1. Historia.....	19
3.1.2. Características y propiedades.....	21
3.1.3. Clasificación de las aleaciones	24
3.1.4. Efecto de los elementos aleantes	27
3.2. Refinación de tamaño de grano.....	29
3.3. Desgasificación.....	30
3.4. Prueba de presión reducida.....	31
3.5. Prueba Tatur.....	32
3.6. Espectros de emisión atómica	33
4. CAPÍTULO IV PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	34
4.1. Abordando el problema	34
4.2. Espectrometría de emisión atómica por arco eléctrico.	39
4.3. Prueba Tatur.....	42

4.4.	Prueba de desgasificado con nitrógeno: Lanza de grafito contra un desgasificador rotativo.	46
4.5.	Prueba de presión reducida.....	50
4.6.	Prueba de contenido de hidrogeno.....	54
4.7.	Porosidad analizada en microscopio óptico.....	56
4.8.	Macro ataque a probetas.....	57
4.9.	Diseño del sistema de alimentación en Solid Works	62
4.10.	Simulación en software SolidCast8	68
4.10.1.	Simulación burda	69
4.10.2.	Simulación de caso actual	75
4.10.3.	Simulación de caso propuesto	87
4.11.	Modelo físico.....	98
4.12.	Manufactura de molde	99
4.13.	Monitoreo del vaciado de piezas con molde actual y molde propuesto	102
5.	CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	104
5.1.	Identificación de los defectos.....	104
5.2.	Análisis de composición química de la aleación	106
5.3.	Análisis de desgasificado	107
5.4.	Análisis de prueba de presión reducida.....	110
5.5.	Análisis contenido de hidrogeno	114
5.6.	Análisis de porosidad.....	121
5.6.1.	Micro porosidad vista en microscopio óptico y electrónico de barrido	121
5.6.2.	Macro porosidad vista en estereoscopio.....	124
5.7.	Análisis tamaño de grano	130
5.8.	Análisis del diseño en Solid Works	136
5.9.	Análisis de simulación en SolidCast8	142
5.9.1.	Análisis de simulación burda.....	143
5.9.2.	Análisis de simulación caso actual.....	144
5.9.3.	Análisis de simulación caso propuesto	144

5.10. Análisis del modelo físico	146
5.11. Molde terminado	151
5.12. Análisis de piezas vaciadas	156
6. CAPÍTULO VII CONCLUSIONES	164
7. CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES	166
BIBLIOGRAFÍA.....	167
FIGURAS.....	170
TABLAS	174
8. BIBLIOGRAFÍA	175

OBJETIVO

Optimizar el proceso de fundición por gravedad para producir la porta plancha R-300 de alta calidad vaciadas con la aleación de aluminio 356 en la empresa Fundición Torrey.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Realizar pruebas de desgasificado con nitrógeno mediante lanza y con desgasificador rotativo.
2. Determinar porcentaje de porosidad antes y después de desgasificar con nitrógeno por medio de la prueba de presión reducida.
3. Evaluar el crecimiento de grano durante el periodo de inicio a fin de vaciado del horno.
4. Diseñar un sistema de alimentación para la pieza en estudio y manufacturar molde permanente en hierro gris.
5. Obtener piezas sin defectos vaciada por gravedad en molde permanente.

HIPÓTESIS

La porosidad por gas en el aluminio en el estado líquido puede ser generada por distintos factores, entre ellos: desgasificación, limpieza del metal líquido, elementos presentes en la aleación y un ineficiente sistema de alimentación; todo esto se relaciona con la producción de piezas de baja calidad.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los problemas de porosidad pueden ser de gran importancia siempre y cuando las piezas fabricadas tengan una aplicación en la que tienen cero tolerancias a la porosidad ya que existen aplicaciones en las que la porosidad hasta cierto grado no es de gran importancia, es por ello que depende de la aplicación que tendrá la pieza para decidir el grado de porosidad permitido [1].

El presente trabajo muestra la optimización del proceso de fundición de aluminio desde el diseño de sistemas de alimentación de moldes permanentes hasta el tratamiento del metal líquido para obtener piezas de alta calidad vaciadas por gravedad.

El estudio fue realizado para tasar y plasmar los tipos de defectos existentes en la porta plancha R-300, Figura 1, pieza utilizada como soporte en la máquina rebanadora de jamón de la empresa FUNDICION TORREY como se aprecia en la Figura 2. Los estudios llevados a cabo se puntualizan más adelante, siguiendo una metodología científica para lograr resultados propicios durante el periodo de estudio.



Figura 1. Porta plancha R-300 de aluminio sin anodizar [2].

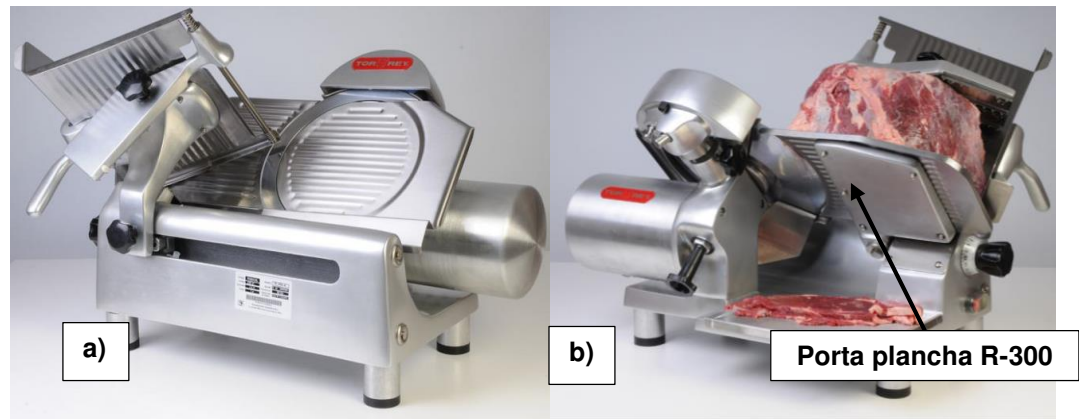


Figura 2 Rebanadora R-300 donde se utiliza la pieza en estudio, °Sólida construcción en aluminio anodizado para carnes rojas sin hueso, a) vista frontal, b) vista trasera [3].

El capítulo II aborda los antecedentes del proyecto, cabe destacar los estudios realizados por el Ing. José Ayala Cázares, se hace un resumen de su trabajo de investigación, se dan a conocer los principales hallazgos que sirven como punto de partida de esta investigación.

El capítulo III muestra una compilación de información para adentrarse en el tema, presentando resumen de artículos, tesis, libros y conferencias de congresos. Se detalla cada prueba usada en procedimiento experimental.

El capítulo IV describe el procedimiento experimental llevado a cabo con la ayuda de diferentes pruebas y métodos de caracterización tales como, prueba de presión reducida, prueba Tatur, estereoscopia, microscopia óptica (MO) y microscopia electrónica de barrido (SEM), se abordó el tema de investigación para obtener información de, la morfología, composición, defectos, densidad y temperaturas.

En paralelo con la prueba de presión reducida, se desgasificó el metal líquido con un rotor y se determinó la densidad de la aleación usando el método de inmersión en un fluido con las mismas probetas ya que se usó un recipiente de acero inoxidable de medidas conocidas. Después se cortaron por la mitad para observar porosidad ocasionada por hidrogeno.

Adicional estas probetas se les realizó un macro ataque químico para observar el crecimiento de grano en relación al tiempo y se analizaron a través del estereoscopio obteniendo diversas imágenes.

El capítulo V presenta la sección de resultados obtenidos con una breve introducción de cómo se han tratado los datos en el periodo de estudio, comprende una parte importante de la información que describe las observaciones obtenida. Los resultados están organizados de tal forma que apoyan a las preguntas de investigación, hipótesis y discusión. De igual manera en este capítulo se aborda la sección de discusión, aquí se interpretan los resultados del estudio y se discuten su significado en base a las cuestiones tratadas en el planteamiento del problema y preguntas de investigación. La discusión comienza con una declaración clara de lo que se encontró en la investigación y se verifica el logro de los principales objetivos del estudio

El capítulo VI muestra las conclusiones de la investigación con la finalidad de llevar al lector a un nuevo nivel de percepción acerca de la investigación, reafirma la hipótesis de la investigación y ofrece respuestas a las preguntas planteadas en la investigación y justifica el método utilizado. Se integra los diferentes temas de la investigación cubiertos en el cuerpo del proyecto, y se hace comentarios sobre el significado de todo esto. Proporcionar una síntesis de las principales conclusiones y argumentos proyectados por la investigación

El Capítulo VII señala las áreas de investigación futuras respecto a nuevas investigaciones futuras sobre el tema o aspectos del proyecto que no se trataron en este estudio pero que son considerablemente importantes de investigar en el futuro cercano.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

La porosidad puede ser producida por diferentes factores, entre los cuales se encuentran: desgasificación, limpieza del metal líquido; los elementos aleantes representa un factor importante, las cantidades de estos determinan el comportamiento de la solidificación, también pueden ser producidos por factores externos durante el proceso de fabricación, por ejemplo, un sistema de alimentación ineficiente.

El Ing. José Ayala Cázares en su investigación titulada *“Estudio de la formación de porosidad en una aleación de Al 356”*, [4], realizó pruebas mejorando la secuencia del proceso así como los tiempos, las temperaturas y las cantidades de los elementos aleantes, llevando un seguimiento a cada cambio realizado sin perder la trazabilidad. Los resultados obtenidos fueron que niveles altos de TiBAl (0.01%) y de Sr (0.006%) presentaban las mejores condiciones, realizó un análisis detallado para conocer el índice de porosidad en las piezas, así como en la refinación, modificación y en el tamaño de grano teniendo valores muy aceptables acorde a la literatura y logrando así un 22% de reducción de porosidad en las piezas.

Por otra parte, realizó estudios a través de software de simulación (ProCast), para conocer el comportamiento del aluminio a 710°C en moldes de arena, así también procedió a llevar a cabo el análisis en molde metálico para conocer los cambios que se obtenían al utilizar otro tipo de material del molde, dejando en claro los mejores resultados para la geometría de la pieza en estudio.

CAPÍTULO III

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aluminio y sus aleaciones

3.1.1. Historia

El aluminio (Al), es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio (sillimanita, andalucita y cianita) puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio o magnesio, pero nunca como metal libre. Además, los silicatos no son menos útiles, porque es extremadamente difícil, y por tanto muy caro, extraer el aluminio de ellas. La bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro descubierto en Les Baux, es la fuente comercial de aluminio y de sus compuestos. Su número atómico es el 13 y se encuentra en el grupo XIII y en el período 3 de la tabla periódica.

Sus compuestos naturales se usaban como astringentes y fijadores cáusticos desde el año 500 a.C. Uno de estos productos, al que los romanos llamaban alumen, era un sulfato natural de aluminio y potasio. Alrededor del año 1200 d.C. se purificaron estas sales minerales a la forma de alumbre cristalizado, y en el siglo XVI se produjo el alumbre ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), a partir de la arcilla. Durante muchos años, el aluminio no pudo ser separado por ningún método conocido de su aleación con otros compuestos.

El aluminio es un metal relativamente nuevo, ya que fue aislado a principios del siglo XIX. En 1782 el químico francés Lavoisier ya hablaba del óxido de un metal todavía desconocido. Esto fue retomado en 1807 por Sir Humphrey Davy, quien propuso inicialmente el nombre “aluminum” para este metal

desconocido, pero más tarde decidió cambiarlo por “aluminium” por coherencia con la mayoría de los nombres de elementos, que utilizaban el sufijo -ium. De éste derivaron los nombres actuales en otros idiomas; sin embargo, en los Estados Unidos se popularizó el uso de la primera forma, actualmente también admitida por la IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry)

El químico danés Hans Christian Oersted lo aisló por primera vez en 1825, pero sólo como polvo, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio, aunque todavía existía una gran cantidad de impurezas en forma de mercurio. Entre 1827 y 1845, el químico alemán Friedrich Wöhler mejoró el proceso de Oersted utilizando potasio metálico y cloruro de aluminio y fue capaz de transformar el polvo en partículas, a partir de las cuales descubrió sus extraordinarias propiedades físicas y fue el primero en medir la densidad del aluminio y demostrar su ligereza

En 1854, Henri Sainte-Claire Deville obtuvo aluminio de 96% a 97% de pureza en Francia reduciendo cloruro de aluminio con sodio. Dada la dificultad de producirlo masivamente, el aluminio era considerado un metal precioso. En 1856 se contempló el primer uso del aluminio en arquitectura, en la punta del monumento a Washington. Ya que el aluminio era un metal máspreciado que el oro.

En 1886, Charles Martin Hall, en Estados Unidos, y Paul L. T. Héroult en Francia descubrieron por separado y casi simultáneamente que el óxido de aluminio o alúmina se disuelve en criolita fundida (Na_3AlF_6), pudiendo ser descompuesta electrolíticamente para obtener el metal fundido en bruto. En 1888, el químico alemán Karl Josef Bayer logró una patente alemana de un proceso mejorado para hacer la alúmina.

Como resultado de los descubrimientos de Hall-Héroult y de Bayer se hizo económicamente factible la producción de aluminio a gran escala por primera vez y se ofreció al mundo la posibilidad de trabajar con el elemento estructural más abundante y más versátil para el uso del hombre. El poder obtener masivamente

aluminio posibilitó que este metal pasara de ser un metal de lujo al alcance de pocos a ser un metal común y familiar. El proceso Hall-Hérault sigue siendo el método principal para la producción comercial de aluminio, aunque en la actualidad se continúan estudiando nuevos métodos. La pureza del producto se ha incrementado hasta el 99,5 % de aluminio en los lingotes comerciales; más tarde puede ser refinado hasta un 99,99 %.

La extracción de aluminio a partir de su estado mineral y el tratamiento posterior a los productos terminados, da lugar a una serie de operaciones consecutivas. En general los diversos procesos se llevan a cabo en los diversos complejos industriales, un resumen de las etapas de la producción desde el mineral de bauxita hasta la producción de piezas vaciadas casting es mostrada en la figura 2.1

3.1.2. Características y propiedades

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por tener una baja densidad (2.7 g/cm³ comparada con 7.9 g/cm³ del acero), elevadas conductividades eléctrica y térmica y muy buena resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. Pueden trabajar con facilidad debido a su elevada ductilidad.

El aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), **Error! Reference source not found.**, y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es la baja temperatura de fusión (660°C), que restringe su campo de aplicación.

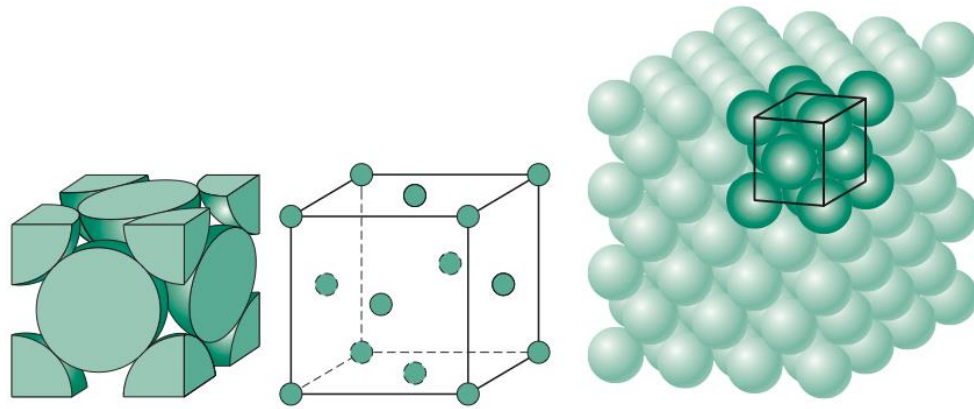


Figura 3

La resistencia mecánica del aluminio se logra por deformación a bajas temperaturas y por adicción de elementos, sin embargo ambos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión. Los principales elementos de aleación de alta solubilidad en aluminio son cobre, magnesio, silicio y manganeso. En la Tabla 2.1.se muestra su porcentaje de solubilidad de estos elementos.

Tabla 3.1

Elemento químico	Máxima solubilidad en el aluminio (%)
Cromo	0.77
Cobre	5.65
Hierro	0.052
Litio	4.0
Magnesio	14.9
Manganeso	1.82
Níquel	0.05
Silicio	1.65
Titanio	1.0
Vanadio	0.5

Las aleaciones de aluminio tienen una importante interacción con sus elementos de aleación. Por esta razón las características microestructurales desarrolladas en su solidificación, el proceso de manufactura y los tratamientos térmicos a los cuales haya sido sometida determinan las propiedades mecánicas que pueda obtener el producto final en condiciones de operación.

Algunas de las aplicaciones más comunes de las aleaciones de aluminio son: partes estructurales de los aviones, latas para bebidas refrescantes, partes de las carrocerías de autobuses y de automóviles, electrodomésticos y máquinas para la industria alimenticia.

El aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no ferrosos, de ahí su elevado uso en la fabricación de piezas automotrices

Sin embargo las propiedades del aluminio también dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio de alta pureza, técnicamente se utilizan sólo aleaciones de aluminio que contienen otros elementos

Las aleaciones de aluminio, se caracterizan principalmente por ser un ligeros. Su resistencia mecánica puede adaptarse a la aplicación que se desee modificando la composición de su aleación, y normalmente son muy resistentes a la corrosión. Los diferentes tipos de tratamiento de superficie pueden mejorar aún más esta propiedad, es un excelente conductor de calor y la electricidad y, en relación con su peso, es casi dos veces mejor conductor que el cobre, cuenta con una alta ductilidad y tiene una densidad y un punto de fusión bajos. En situación de vaciado, puede procesarse de diferentes maneras. Su ductilidad permite que los productos de aluminio se fabriquen en una fase muy próxima al diseño final del producto, aparte de ser un material totalmente reciclable, sin merma de sus cualidades. La recuperación del aluminio al final de su vida útil requiere de poca energía. El proceso de reciclado consume sólo un cinco por

ciento de la energía que fue necesaria para producir el metal inicial. En la tabla 2.2 se pueden observar algunas de las propiedades químicas del aluminio.

3.1.3. Clasificación de las aleaciones

El aluminio puro, es un material poco usado ya que sus propiedades mecánicas son muy bajas, pero estas se mejoran al realizar una amplia gama de aleaciones metálicas usadas en un amplio campo de aplicaciones.

En la actualidad se produce una extensa variedad de aleaciones de aluminio, para la identificación de cada una de estas, la Asociación del Aluminio (The Aluminum Association) en Estados Unidos desarrolló un sistema de designación para distinguir las aleaciones, (Tabla 3) así como para indicar que tratamiento (térmico o mecánico) se les ha aplicado.

Es conveniente dividir las aleaciones de aluminio en dos categorías principales: composiciones forjadas y composiciones fundidas. Pero para el presente trabajo únicamente se presentan para composiciones vaciadas ya que se trabaja con A356.

1xx.x (99.0% de aluminio mínimo) Generalmente estas aleaciones tienen composiciones controladas que no llevan aleantes, con purezas del 99.00% de Al o superior. Tienen muchas aplicaciones, especialmente en el campo químico y eléctrico en las que destaca especialmente los rotores de motores eléctricos. En general esta aleación es usada en aplicaciones donde se requiera una alta conductividad eléctrica, aleaciones usadas para estas aplicaciones incluyen la 100.0 y 170.0.

2xx.x (Al-Cu) Esta aleación tiene contenidos del 4-8% de cobre, con algunos elementos de aleación. Son tratables térmicamente y pueden alcanzar alta resistencia y ductilidad, especialmente si se preparan a partir de un lingote que contenga menos de 0.15 % de hierro. El principal atributo de las aleaciones altas en cobre (7 a 8%) es su insensibilidad a las impurezas. Esta aleación es utilizada donde se requiera un alto esfuerzo a la cedencia y elongación

moderada. Las aplicaciones de esta aleación incluyen: cabezas automotrices, pistones, engranes, carcasas de bombas. Las aleaciones usadas son la 201.0, A201.0, A206.0, 208.0 222.0, etc.

3xx.x (Al-Si-Mg), (Al-Si-Cu) o (Al-Si-Mg-Cu) De este tipo de aleaciones, las más ampliamente utilizadas son las que contiene silicio y cobre. En estas aleaciones el cobre proporciona resistencia y el silicio facilita el vaciado, reduciendo defectos en el material al ir solidificando; por lo tanto, las aleaciones con contenidos altos de silicio se utilizan para producir piezas de formas intrincadas. Cuando las aleaciones contienen más de 3 % en peso de cobre estas son tratables térmicamente, aunque normalmente estos tratamientos se realizan cuando la aleación contiene también magnesio, el cual mejora la respuesta al tratamiento. Las aleaciones de alto silicio (mayor al 10%) presentan baja expansión térmica y presentan algunas ventajas en operaciones a altas temperaturas. Cuando el contenido de silicio excede del 12 ó 13% (puede ser tan alto como el 22%), se presentan cristales primarios de silicio y si se encuentran apropiadamente distribuidos, imparten excelente resistencia al desgaste. En general este tipo de aleaciones presentan buena fluidez, resistencia a grietas en caliente, buena soldabilidad, bajos rechupes por solidificación, resistencia a corrosión y resistencia mecánica moderada. Las aplicaciones de esta aleación incluyen ornamentales, reflectores, partes de suspensión, pistones y principalmente monoblocks y cabezas automotrices. Las aleaciones más comunes son las siguientes: 308.0, 319.0, A319.0, B319.0, 320.0, 332.0, 333.0, A333.0, A336.0, 354.0, 356.0.

4xx.x (Al-Si) Estas aleaciones no contienen cobre y son utilizadas donde se requiere buena resistencia a la corrosión y buenas características de vaciado. Las aleaciones con menos del 12% de silicio se denominan hipoeutécticas, las cercanas al 12% de silicio son eutécticas y aquellas que sobrepasan el 12% son llamadas hipereutécticas. En caso de que se requiera alta resistencia y dureza, la adición de magnesio provoca que estas aleaciones sean tratables térmicamente. Se han utilizado aleaciones con contenidos de silicio tan bajo

como un 2%, pero normalmente este elemento se emplea en porcentajes de entre un 5 y un 13%; la resistencia y ductilidad de estas aleaciones, especialmente aquellas con alto silicio, se mejoran sustancialmente mediante la modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio. En general este tipo de aleaciones son de uso general, teniendo buenas características para vaciar en grandes cantidades, piezas con partes intrincadas de secciones delgadas. Se presentan buenas propiedades mecánicas además de una excelente resistencia a la corrosión y muy buena soldabilidad. Las aplicaciones de esta aleación son: utensilios de cocina, aplicaciones marinas, ornamentales, propelas, defensas, etc.

5xx.x (Al-Mg) En este tipo de aleaciones el magnesio es el elemento aleante principal; son esencialmente aleaciones binarias de una sola fase con resistencia entre moderada y alta, lo mismo que su tenacidad. La principal ventaja de estas aleaciones es su alta resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes marinos, algunas de las aleaciones usadas en ambientes corrosivos son las siguientes: 512.0, 513.0, 514.0 y 535.0. Para la alta resistencia a la corrosión se requiere un bajo contenido de impurezas, por lo cual estas aleaciones se deben de preparar con metal de alta calidad. Estas aleaciones son adecuadas para ensambles soldados y son frecuentemente utilizadas para acabados arquitectónicos, en la construcción. En general este tipo de aleaciones posee buena maquinabilidad, de apariencia atractiva cuando se anodizan; pero la baja característica de vaciado y la tendencia del magnesio a oxidarse, aumenta la dificultad de manejo y por lo tanto su costo.

7xx.x (Al-Zn) Generalmente el contenido de cinc se encuentra en mayor proporción de los elementos aleantes, pero también tiene contenidos de cobre, magnesio, cromo o combinaciones de éstos. Este tipo de aleaciones envejecidas en forma natural, alcanza su máxima resistencia a temperatura ambiente después de los 20-30 días de ser vaciadas. En este tipo de aleaciones no requiere una temperatura demasiado alta de solubilizado y un temple drástico para obtener propiedades óptimas, sin embargo puede ocurrir micro-segregación de las fases Mg-Zn, lo cual se contrapone a la regla de que a mayor rapidez de

solidificación se obtienen mayores propiedades en la condición de vaciado. En la condición de vaciado estas aleaciones presentan propiedades en tensión entre moderadas y buenas. Con tratamiento de envejecido se obtiene buena estabilidad dimensional de la pieza de trabajo; poseen buena maquinabilidad, buena resistencia a la corrosión generalizada, pero no son recomendables para servicio a altas temperaturas porque se provoca un sobre-envejecimiento, el cual causa ablandamiento. Entre las aleaciones comerciales se encuentran las siguientes: 710.0, 711.0, 712.0, 771.0 y 772.0.

8xx.x (Al-Sn) Este tipo de aleaciones presentan un contenido de estaño de 6%, generalmente se utilizan para la fabricación de bujes y chumaceras, debido a la lubricación impartida por el estaño. Estas aleaciones fueron desarrolladas para satisfacer las demandas de los equipos que requieren bujes, en donde la capacidad de carga, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión sea alta (corrosión provocada por los aceites lubricantes en motores de combustión interna). Los bujes fabricados con estas aleaciones son superiores en lo general a los construidos con la mayoría de los aceros. Las aleaciones más usadas son las siguientes 850.0, 851.0, 852.0, 853.0

3.1.4. Efecto de los elementos aleantes

Silicio.

Aleación que más se ocupa (en la cocina, estufas) entre 1-6% es hipo eutéctico (corre como agua, buenas para fundiciones de sección delgada) poseen buena fluidez, híper eutéctico 13% hacia arriba (más conocido en los pistones, por su resistencia al desgaste), al 11,7% Si se forma el eutéctico. Como no es un metal la aleación es frágil. La dureza de la aleación aumenta con el contenido de Si, pero la ductilidad y maquinabilidad se reducen.

Cobre.

Mejora la resistencia, la dureza ("duro aluminio"), maquinabilidad y conductividad térmica. Los tratamientos térmicos son más efectivos entre el 4-6% Cu, sino disminuyen la capacidad de colada y aumenta el funcionamiento en caliente (tiende a tirarse y se raja). La reacción eutéctica ocurre a los 548°C.

Durante la solidificación la aleación hipo eutéctica se forma inicialmente una fase rica en aluminio. Cuando la temperatura del eutéctico cae, el líquido residual se separa en y en un compuesto inter metálico. De forma negativa el cobre reduce la resistencia a la corrosión del aluminio.

Hierro.

Niveles de 0,9-1,0% de Fe se utilizan en la presión de las aleaciones de fundición a para evitar que se pegue. Un alto contenido de Fe disminuye la ductilidad, la resistencia a los golpes y la maquinabilidad. Según el diagrama de fases la mayor parte del hierro se mantiene en la fase líquida hasta el eutéctico de solución sólida más inter metálico de partículas constituyentes que contienen una estructura cristalina monoclinica congelada.

Manganeso.

Mejora la solidez del bastidor en más de un 0,5%. El Mn controla la formación de hierro intermetálico en la aleación, lo que mejora la ductilidad y características de la contracción. Forma precipitados.

Níquel.

Cuando se combina con Cu, mejora la resistencia y la dureza a elevadas temperaturas. Caso especial.

Zinc.

Cuando se combina con cobre y magnesio, las características tratamientos térmicos y el envejecimiento natural son mejoradas. Mejora la fluidez, pero pueden ocurrir problemas de contracción.

Plomo.

Mejora la maquinabilidad en los niveles sobre el 0,1%.

Titanio.

Afinamiento de la estructura del grano cuando se combina con boro.

Fosforo.

Afina la fase primaria del Si en las aleaciones hipereutécticas. En las aleaciones hipoeutécticas bajos niveles de fosforo engruesan la estructura eutéctica y reducen el efecto de los modificadores eutécticos de Na y Sr.

Estroncio.

Niveles de 0,008-0,04% de Sr modifican la estructura del eutéctico Al-Si.

Sodio.

Se usa como modificador de estructuras eutécticas.

Litio.

Se usa en la industria aeronáutica. El litio de hasta el 3% mejora las propiedades de las aleaciones de Al forjado. En general tiene un efecto perjudicial sobre la conversión de propiedades mediante la reducción de la eficacia de los modificadores de Na y Sr en niveles superiores al 0,5%. En niveles aún más bajos, por encima del 0,01%, se experimentan problemas de porosidad.

3.2. Refinación de tamaño de grano

Refinamiento del grano aumenta la resistencia al desgarro en caliente, reduce los efectos perjudiciales de la porosidad del gas y redistribuye la porosidad en las aleaciones de aluminio. El tamaño de grano de una aleación depende del número de núcleos presentes en el metal líquido a medida que comienza a solidificarse y de la tasa de enfriamiento. A mayor velocidad de enfriamiento en general, promueve un tamaño de grano más pequeño.

La adición de ciertos elementos de aleación de aluminio puede ofrecer núcleos de crecimiento del grano. El titanio, en particular en asociación con el boro, tiene un efecto nucleante de gran alcance y es el refinador de grano más comúnmente utilizados. Titanio solo, añadido a razón de 0.02-0.15%, se puede utilizar, pero el efecto se desvanece en 40 minutos. La adición de boro con titanio produce granos más finos y reduce la decoloración.

La desgasificación y el refinamiento de grano deben hacerse simultáneamente (esto es porque las tabletas nucleantes pueden absorber humedad y en consecuencia aumentar el contenido de hidrogeno).

Es bien sabido que los metales y aleaciones por lo general se solidifican con estructura de grano columnar grueso bajo condiciones de colada normales a menos que el modo de solidification se controle cuidadosamente. Es posible

desarrollar granos equiaxiales finos en la estructura, ya sea aumentando el número de sitios de nucleación o por la multiplicación de granos. McCartney ha definido refinamiento del grano como la supresión deliberada de crecimiento de grano columnar, en lingotes y piezas de fundición y una buena formación de la estructura de solidificación equiaxial por todo el material.

Las ventajas que principalmente se obtienen con el refinamiento de grano es: disminución de la tendencia al agrietamiento en caliente, también se obtienen distribución de porosidad a lo largo de las piezas vaciadas, en cuanto a propiedades mecánicas existe una mejora en la resistencia a la tensión y elongación.

Una de las desventajas en este proceso de refinación es que al tener el metal con tamaños de grano muy finos disminuye la fluidez y puede ser un factor importante en el llenado de piezas. Existen dos procesos para llevar a cabo el refinamiento de grano, uno es mediante el proceso de enfriamiento rápido con el uso de templaderas en los moldes produciendo un enfriamiento rápido y a la vez el refinamiento de grano y el segundo es a través de químicos, mediante agentes nucleantes, generando mayor cantidad de sitios de nucleación.

3.3. Desgasificación

El proceso de desgasificación consiste en burbujas de gases secas, inertes que a través de la fusión reducirán el nivel de hidrógeno alrededor de 0,1 ml por cada 100 g. Las solubilidades líquidos y sólidos del hidrógeno son diferentes en distintos sistemas de aleación y un nivel de hidrógeno de 0,12 ml/100 g dará una fundición libre de porosidad en LM4 (Al-Si5Cu3Mn0.5), mientras que en una aleación baja de silicio Al-Cu-Ni de aleación BSL119 estará libre de porosidad en un 0,32 ml H₂/100 g. Si los niveles de hidrógeno se toman demasiado bajos, es difícil evitar algo de porosidad en las piezas de fundición.

Se utiliza la desgasificación con nitrógeno seco o argón con una lanza o, preferiblemente, un impulsor rotativo especialmente diseñado que garantiza una dispersión uniforme de burbujas finas a lo largo de la masa fundida.

3.4. Prueba de presión reducida

El ensayo consiste en la toma de una muestra de Al líquido y su solidificación dentro de un crisol de acero aislado térmicamente para que el frente de solidificación se produzca en la cara superior (interfase líquido/gas). Normalmente se toma una muestra de 150 a 200 gramos. Se efectúa un vacío de entre 50 a 100 mm de Hg. Valor Cualitativo: la forma convexa de la probeta, si la probeta está deprimida es decir cóncava, el contenido de gas es bajo.

En los últimos años el valor de la RPT ganó el reconocimiento y, finalmente, se convirtió en la técnica más ampliamente utilizada en las fundiciones de aluminio de todo el mundo, para obtener una evaluación cualitativa y/o semi-cuantitativa del contenido de hidrógeno en aleaciones de aluminio fundido, además permite evaluar la eficiencia del gas utilizado, el tiempo de aplicación, el tiempo de espera, etc.

Es bien aceptado que el equipo necesario es relativamente barato, duradero y fácil de usar, y que la evaluación del contenido de hidrógeno puede ser evaluado en forma rápida y fácilmente.

Sin embargo, para que el RPT sea una herramienta de control de calidad confiable, es esencial que las variables influyentes (de vacío constante, calibración frecuente, efecto de la variación en la presión de vacío en los resultados de la muestra, y los procedimientos de operación apropiadas) sean comprendidos, controlados y estandarizados.

Una sección cortada y pulida hace que la superficie sea más fácil de inspeccionar. La estimación del contenido de gas en la masa fundida se correlaciona con el tamaño y número de poros presentes en la superficie. La menor cantidad de poros y su menor diámetro en la muestra sería una indicación de menor gas en la masa fundida.

La gravedad específica es sólo un indicador de contenido de gas del metal fundido; cuando mayor sea la gravedad específica de la muestra, menor es el gas presente en la masa fundida. Para determinar la gravedad específica, la muestra se pesa en aire y después en agua. Se necesita una balanza de pequeña escala de laboratorio para facilitar las mediciones en el aire y en el agua y se

requiere un cálculo manual de la gravedad específica ó puede ser un equipo de cálculo directo automático

3.5. Prueba Tatur

La prueba Tatur es una técnica utilizada para evaluar macro y micro porosidad en aleaciones. La prueba utiliza un molde permanente de geometría estándar. El asentamiento y la contracción, macro porosidad y micro porosidad puede evaluarse por medición de la densidad y el desplazamiento de la contracción. Estos tipos de contracción se ven afectados por muchos parámetros, tales como inclusiones, contenido de gas, elementos de aleación refinamiento de grano, la modificación en la microestructura y la tasa de enfriamiento

Los investigadores Argo y Gruzleski utilizaron la prueba Tatur como una medida para controlar los niveles de Hidrógeno de 0.20 ml H₂/100 g Al. La prueba consta de un molde permanente de geometría fija. Utilizando una técnica sencilla para medir la densidad y el desplazamiento de agua, esto es posible para cuantificar el volumen de micro contracción, macro contracción y el asentamiento de metal por contracción. A fin de obtener información confiable se requiere tomar una serie de muestras para poder evaluar estadísticamente.

La densidad teórica puede ser obtenida por cálculos, mientras que la densidad aparente puede ser calculada con el principio de Arquímedes. El total de la contracción de la aleación no es afectada por la modificación, solamente cambia de macro contracción a micro contracción, la modificación con estroncio o sodio generan cambios en la disminución de macro contracción, pero a su vez se genera un aumento en la micro contracción, en otras palabras, la micro contracción es re-distribuida cuando la modificación ocurre.

A través de este estudio se puede evaluar la distribución de porosidad que existe en el material, realizando pruebas controlando la temperatura de molde y de metal líquido, el siguiente esquema. muestra la geometría de molde que se utiliza en este estudio, así también la distribución y concentración de macro porosidad y micro porosidad.

3.6. Espectros de emisión atómica

A temperatura ambiente, todos los átomos de una muestra se encuentran en el estado fundamental. Por ejemplo, el único electrón externo del sodio metálico ocupa el orbital 3s. La excitación de este electrón a orbitales más altos se puede conseguir por el calor de una llama o un chispa o arco eléctrico. El tiempo de vida de un átomo excitado es breve, y su vuelta al estado fundamental va acompañada de la emisión de un fotón de radiación.

Estas técnicas, que empezaron a reemplazar en los años veinte los métodos gravimétricos y volumétricos clásicos para el análisis elemental, se basaron en la obtención de espectros de emisión de los elementos por medio de su excitación con arcos eléctricos o chispas de alta tensión. Estos espectros permiten la determinación cualitativa y cuantitativa de elementos metálicos en varios tipos de muestras, como metales y aleaciones, suelos, minerales y rocas. Estos equipos todavía se usan en análisis cualitativo y semicuantitativo, sobre todo en las industrias de los metales. Las fuentes de plasma están desplazando a los arcos y las chispas, y es probable que continúe esta tendencia. En las fuentes de arco y chispa la excitación de la muestra se produce en el pequeño espacio existente entre un par de electrodos. El paso de electricidad entre los electrodos a través de este pequeño espacio proporciona la energía necesaria para atomizar la muestra y producir átomos o iones en estado electrónico excitado. Debido a su inestabilidad, es necesario integrar las señales de emisión provenientes de las fuentes de arco y de chispa durante al menos 20 s, y a menudo, durante un minuto o más, para obtener datos analíticos reproducibles

CAPÍTULO IV

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. Abordando el problema



Figura 4 Molde actual de la porta plancha montado en el área de trabajo.

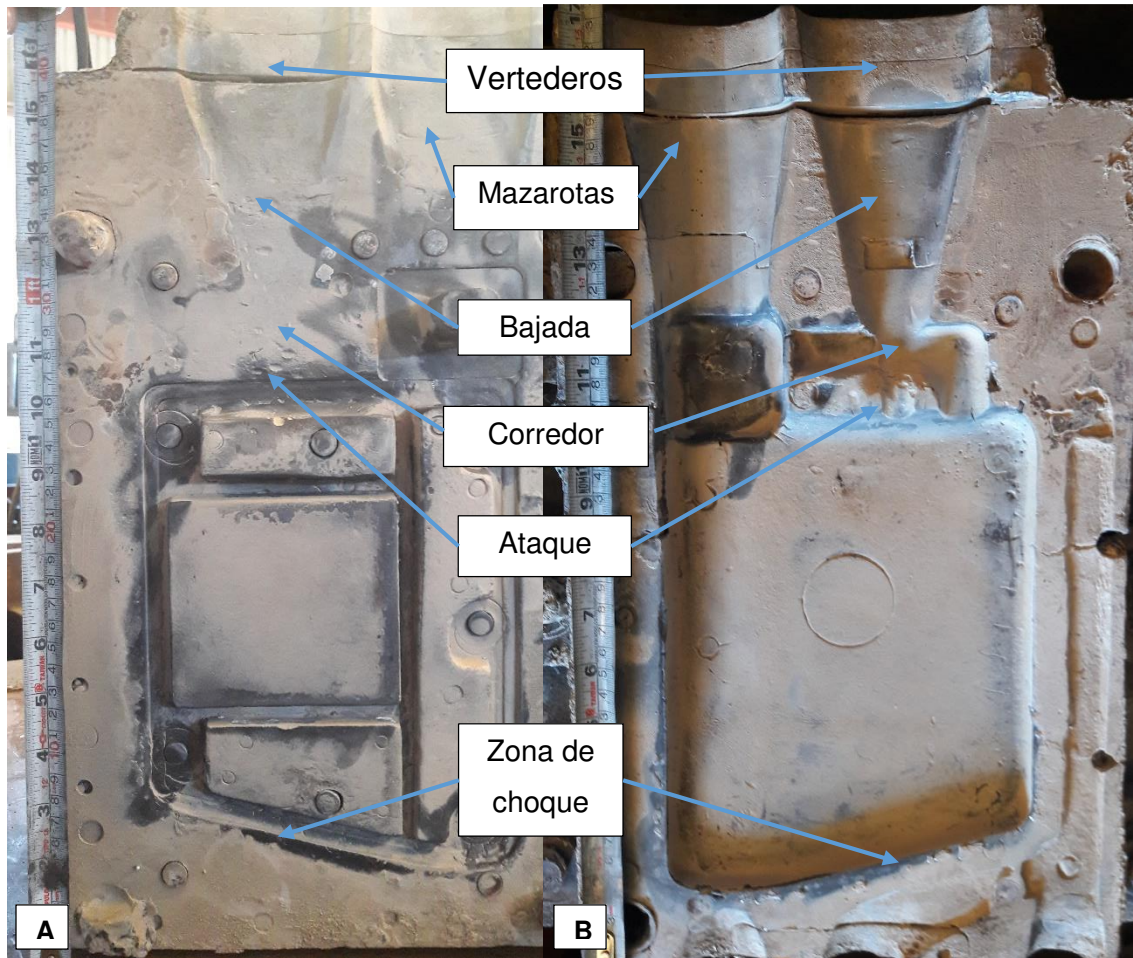


Figura 5. Interior del molde porta plancha, parte A y B respectivamente.

El molde metálico que se ha estado usando para fabricar la porta plancha R-300, presenta deterioros severos y carece de un sistema de alimentación como se observa en la Figura 5. Esto provoca un 40% del rechazo interno de la producción de Fundición Torrey, traduciéndose en energía, tiempo y dinero desperdiciado. Todo esto tiene como consecuencia la aparición de diversos defectos por fundición en la pieza, los cuales fueron analizados estadísticamente como se muestra en la Figura 6.

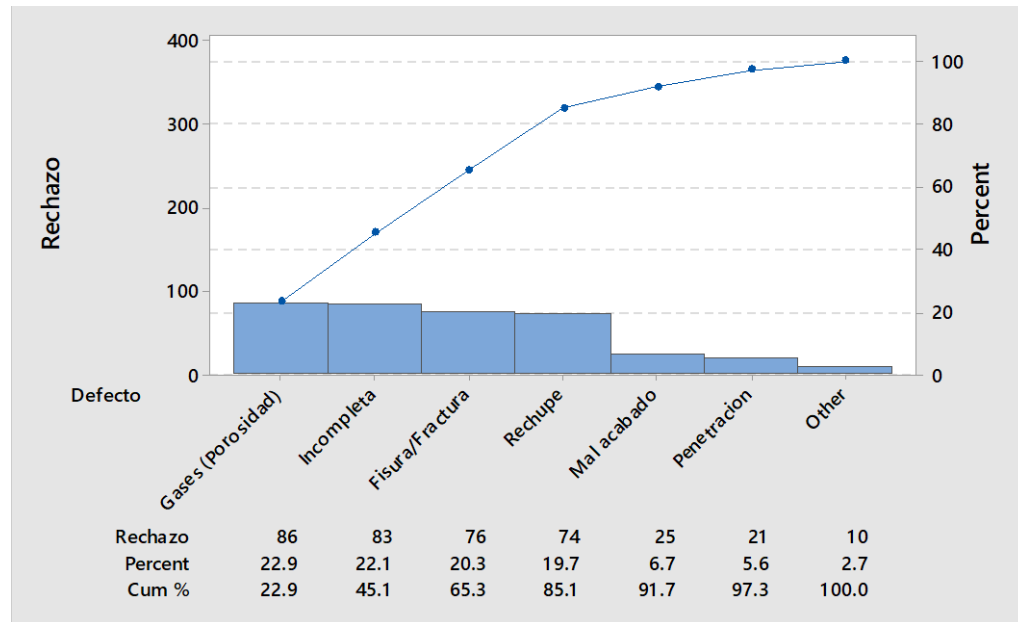


Figura 6. Pareto de defectos encontrados en la porta plancha R-300 R-300

Se realizó un diagrama de Pareto usando Minitab basado de los reportes de rechazo diario donde las categorías se ordenaron en barras usando frecuencias en orden decreciente, con una línea añadida para mostrar la suma acumulada. [5] Este grafico de Pareto fue útil para identificar aquellos defectos que tienen el mayor efecto acumulativo en el estudio, por lo tanto, se despreciaron los factores menos significativos para el estudio bajo el principio de Pareto o regla del 80-20 el cual que el 20% de la lo de las variables de entrada son responsable del 80% de los resultados obtenidos. Dicho de otra manera, el 80% de las consecuencias se derivan de 20% de las causas.

Por otro lado, se analizó la propuesta de diseñar un molde permanente con un sistema de alimentación optimizado para la fabricación de la pieza, ya que según estudios anteriores demuestran que, utilizando un molde metálico con un llenado laminar ocurre un llenado lento con un enfriamiento rápido esto puede traer consigo una disminución en la porosidad.

Se elaboró un mapa de flujo de valor para ilustrar, analizar los pasos necesarios para la fabricación de la pieza en estudio. Ver Figura 7.

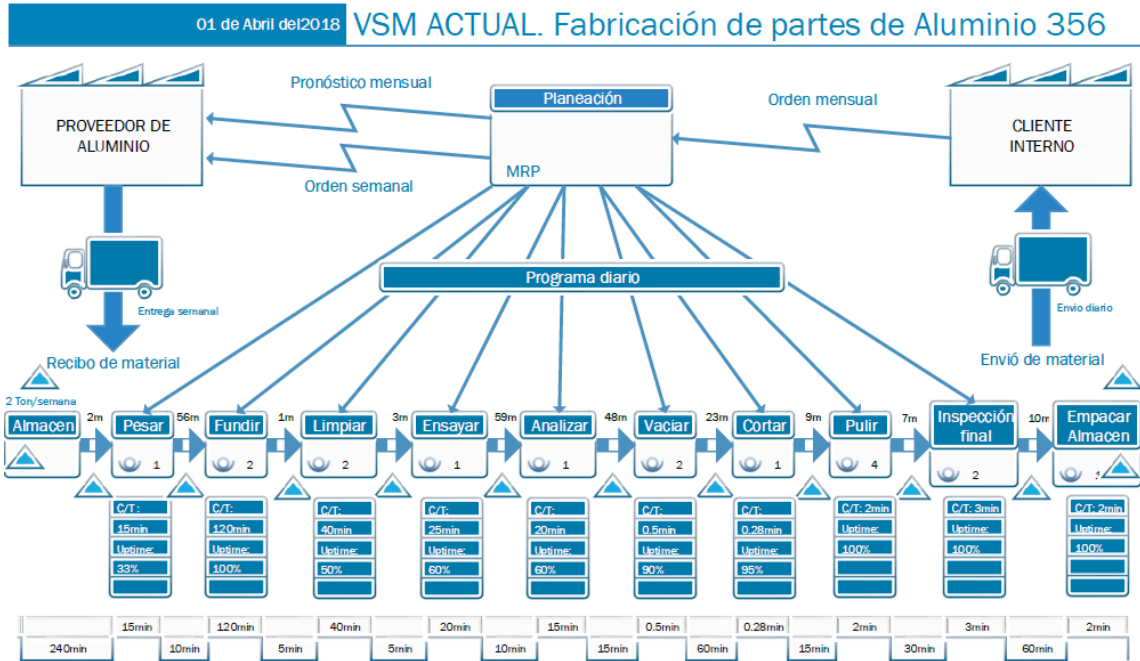


Figura 7. Mapa de flujo de valor para la elaboración de la porta plancha R-300

Los VSM son particularmente útiles para encontrar y eliminar desperdicios. Los elementos se representan en un mapa en función de si agregan o no valor desde el punto de vista del cliente, con el objetivo de eliminar aquellos que no agregan valor. En este estudio se usó para conocer el proceso e identificar las actividades potenciales de causar defectos en la pieza final, entender la situación actual y tener una perspectiva de todo el proceso.

Para determinar la causa-raíz de un efecto, se abordó la problemática con diagrama de causa y efecto también conocida como diagrama de pescado y/o diagrama de Ishikawa, una herramienta de lluvia de ideas útil para generar la matriz de causa y efecto más adelante. Se categorizó de acuerdo a las principales causas de manufactura, esto es, seis factores que influyen en el proceso: Mano de obra, maquinaria, materiales, método, medición y medio ambiente, Figura 8.

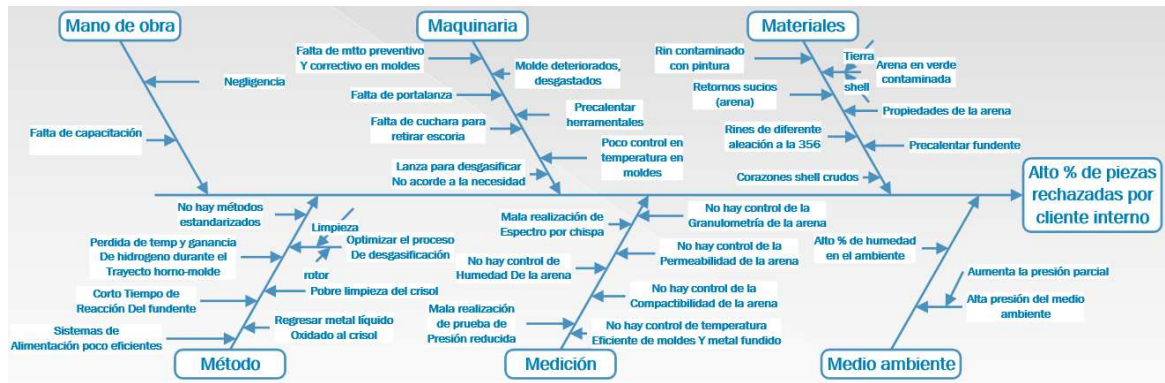


Figura 8. Diagrama de Ishikawa

Basados en el diagrama de causa y efecto, se hizo una tabla para identificar las diferentes causas y efectos de la problemática y enfatizar la importancia del entendimiento de los requerimientos del cliente. La matriz sirve sólo para identificar impactos y su origen sin proporcionarles un valor. Sin embargo, estima la importancia y magnitud de los impactos con la ayuda del cliente y de otros profesionales involucrados en el proyecto, revisar Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de causa y efecto

C & E Matrix Nivel de Importancia para el cliente			10	10	8	10	6	8	8	8	10	10	
			Piezas sin porosidad por gas	Piezas sin fracturas	Piezas sin rechupes	Piezas completas	Sin penetración de arena	Piezas sin inclusión de arena	Acabado superficial	Piezas sin juntas frías	Piezas sin inclusión de escoria	Pedido a tiempo	
No.	Proceso	Característica del Proceso	CALIFICACIÓN										TOT
1	Fundir	Temperatura de metal líquido en crisol	9	6	6	9	6	3	0	9	3	3	480
9	Vaciar	Temperatura de molde.	6	9	9	9	3	3	6	9	0	0	474
4	Ajuste químico y limpieza	Limpieza del metal (sin escoria).	9	3	0	3	0	0	9	0	9	6	372
5	Ajuste químico y limpieza	Limpieza del crisol (escoria, inclusiones, óxidos)	9	3	0	3	0	0	9	0	9	6	372
16	Vaciar	Humedad arena en verde	9	0	0	6	9	9	9	0	0	0	348
19	Vaciar	Temperatura de sinterización corazones shell	9	6	0	6	6	6	6	0	0	0	342
20	Vaciar	Tiempo de sinterización corazones shell	9	6	0	6	6	6	6	0	0	0	342
17	Vaciar	Granulometría arena en verde	9	0	6	0	9	9	9	0	0	0	336
13	Vaciar	Permeabilidad arena en verde	9	0	3	6	6	6	6	0	0	0	306
7	Ensayo y análisis	Composición química de la aleación.	3	6	3	6	0	0	0	3	6	3	288
2	Ajuste químico y limpieza	Tiempo de aplicación del fundente.	6	0	3	3	0	0	6	0	9	3	282
14	Vaciar	Bentonita Na Ca	0	6	3	0	9	9	9	0	0	0	282
3	Ajuste químico y limpieza	Tiempo de desgasificado con nitrógeno.	9	0	0	0	0	0	6	0	9	3	258
8	Ensayo y análisis	Presencia de hidrógeno en metal.	9	3	0	0	0	0	9	0	0	6	252
11	Vaciar	Velocidad de vaciado.	9	0	0	6	0	6	0	0	3	0	228
15	Vaciar	Contaminación arena en verde.	3	0	0	0	9	9	9	0	0	0	228
10	Vaciar	Tiempo de vaciado.	9	3	0	6	0	0	0	3	0	0	204

Identificadas las causas, encerradas en el recuadro rojo, que tienen un efecto negativo en la producción de piezas sanas, la investigación girará en base a esas variables con una serie de pruebas de calidad y experimentos que se desarrollarán paso a paso y serán abordados en los siguientes subtemas.

4.2. Espectrometría de emisión atómica por arco eléctrico.

Se obtuvo la composición química de la aleación por medio de un espectrómetro de emisión óptica para conocer el porcentaje de los elementos aleantes presentes. El procedimiento de obtención de la probeta fue el siguiente; Se vertió aluminio líquido a una temperatura de 710°C sobre un recipiente cerámico de paredes de gran espesor aproximadamente 10mm, Figura 9.



Figura 9. Obtención de la probeta de aluminio vertiendo aluminio líquido a 710°C en un recipiente cerámico

Se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta que la muestra solidificó completamente. Se retiró del interior del recipiente y se pulió con lija de grado 120 una de las caras hasta darle una planicidad homogénea. Figura 10.

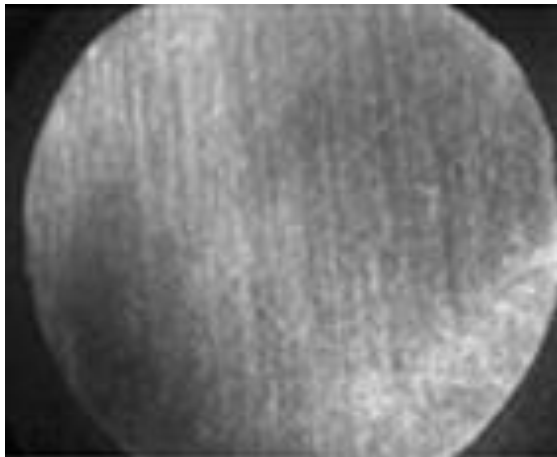


Figura 10. Probeta para análisis de composición química pulida con lija 120

Posteriormente se preparó el espectrómetro siguiendo el protocolo de seguridad y manual de operación [6]. Un flujo de 0.5L/min de gas inerte, argón, se usó como atmosfera protectora para evitar la oxidación durante el ensayo destructivo.

A continuación, se muestra el equipo, ver Figura 11, utilizado para obtener la composición química de la probeta.



Figura 11. Espectrómetro de chispa Bruker destinado al análisis de metales

La prueba duró 120s, Figura 12, y se realizaron tres ensayos a la misma probeta en diferente zona, con la finalidad de obtener un promedio. **Error! Reference source not found.**



Figura 12. Momento justo durante de la realización de la prueba por arco eléctrico

4.3. Prueba Tatur

Se obtuvieron muestras para la prueba Tatur directamente en planta. Se montó un área de trabajo para colocar el molde. El procedimiento fue el siguiente: Se precalentó el molde Tatur a una temperatura de 150°C y se vació aluminio a una temperatura de 710°C . Figura 13. Se obtuvieron tres probetas.



Figura 13. Probetas Tatur para estudio de porosidad, microporosidad y análisis de contracción

Para llevar a cabo el análisis de la prueba tatur se aplicaron las ecuaciones mencionadas en el subtema 2.3.3, donde se menciona el procedimiento para obtener el estudio completo de la prueba Tatur.

El aluminio A356 tiene densidad teórica 2.7 gr/cm^3 y el volumen teórico que exhibe el molde Tatur es de 202 cm^3 . Para obtener el volumen del casting (V_c), se colocó una cantidad de volumen de agua en un recipiente, el cual se pesó y se calibró a cero la báscula; posteriormente se sumergió el casting suspendido dentro de un recipiente lleno de agua, ver Figura 14, el volumen desplazado tuvo un incremento en el peso y utilizando la densidad del agua, corresponde al volumen del casting de acuerdo a la ley de Arquímedes. [7].



Figura 14. Medición del peso de agua desplazada por el casting

Para el cálculo de la Densidad Aparente (DA), se pesó la masa del casting y se dividió entre el Volumen del casting, V_c , que se obtuvo con la ecuación [A2].

Para obtener el Volumen de Porosidad interna (V_{por}) se utilizó la densidad de 2.7 gr/cm^3 , la DA y V_c . Para obtener el Volumen de asentamiento y contracción (V_{sc}), se requirió el Volumen inicial desde el estado líquido (volumen del molde Tatur) 202 cm^3 , el Volumen de la macro porosidad V_p , se obtuvo pesando la cantidad de agua que ocupa este espacio, zona color en color verde denotado por la letra “b”, Figura 15, y utilizando la ecuación [9] se obtuvo el volumen de esta zona. El volumen del asentamiento y contracción que corresponde a la zona denotada en color azul “c” de la Figura 15 será dada por la ecuación

$$V_{sc} = 202 - V_p - V_c$$



Figura 15. Zonas de porosidad y distribución de contracción ocurrida una vez solidificada la aleación

Para obtener el Volumen total de contracción (V_{tc}) se sumó el Volumen de Porosidad interna, V_{por} , el Volumen de Asentamiento y Contracción, V_{sc} , y también el volumen de la macro porosidad, V_p .

$$V_{tc} = V_{por} + V_{sc} + V_p \quad (A6)$$

Datos teóricos obtenidos de SolidWorks y ProCAST:

Densidad 2.7 gr/cm^3

Volumen casting 202cm^3

Masa casting 543 gr

Tabla 3.1. Estos datos se obtuvieron del software Solid Work y ProCast.

Resultados obtenidos para un casting: a continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos como un ejemplo, los detalles son mostrados en el Anexo I.

Masa al aire MA (gr)	Masa en el agua MA (gr)	Masa de Macro porosidad V_p (gr)
494	184	0.014

Tabla 3.2. Información obtenida al realizar las mediciones.

V_c (cm^3) Ec.(A2)	V_p (cm^3)	DA (gr/cm^3) Ec. (A3)	V_{por} (cm^3) Ec. (A4)	V_{sc} (cm^3) Ec. (A5)	V_{tc} (cm^3) Ec. (A6)	% Porosidad Ec. (A1)
184	0.014	2.68	1.04	17.986	19.04	0.563

Tabla 3.3. Resultados obtenidos de los diferentes volúmenes de contracción y porosidad de la prueba Tatur.

4.4. Prueba de desgasificado con nitrógeno: Lanza de grafito contra un desgasificador rotativo.

Se usaron dos métodos de desgasificado distintos con la finalidad de evaluar el impacto que tienen en la extracción de hidrogeno cada método. Se utilizó un método que actualmente se usaba en la planta, el cual consiste en una lanza de grafito como se aprecia en la Figura 16, de 100cm de longitud y 10cm de diámetro con pequeños orificios en la punta. El desgasificado se hizo después del tratamiento del metal líquido, esto significa después de hacer el ajuste con 200g de TiBAI, 198g de estroncio, 174g de manganeso y 300g de fundente de limpieza. La lanza se introdujo en el crisol durante 30min con el quemador encendido y se hizo circular un flujo de nitrógeno gas de 5L/min con la finalidad de desgasificar desde el fondo del crisol como se aprecie en Figura 17. Al finalizar el desgasificado se retiró la escoria con una cuchara de acero recubierta con pintura refractaria como lo evidencia la Figura 21.



Figura 16. Lanza de grafito usada para inyectar gas nitrógeno



Figura 17. Desgasificado mediante el uso de lanza de grafito

El segundo método consistió en instalar un desgasificador rotativo móvil, Figura 18. Se utilizó una lanza de grafito de 80cm de longitud y 15cm de diámetro con rotor de geometría cuadrada de 25cm por lado. Se introdujo 60cm en el aluminio líquido. Se utilizó un flujo de nitrógeno de 1 L/min Figura 19 durante 10 minutos a velocidades de 600rpm con el quemador del horno apagado, Figura 20. El desgasificado se hizo después del tratamiento del metal líquido, esto significa después de hacer el ajuste con 200g de TiBAI, 198g de estroncio, 174g de manganeso y 300g de fundente de limpieza. Al finalizar el desgasificado se retiró la escoria con una cuchara de acero recubierta con pintura refractaria como lo evidencia la Figura 21.



Figura 18. Desgasificador rotativo



Figura 19. Presión de nitrógeno utilizado durante la desgasificación



Figura 20. Rotor en funcionamiento, desgasificando 600kg de aluminio líquido



Figura 21. Retirar escoria de la superficie del aluminio líquido

4.5. Prueba de presión reducida

Se obtuvieron muestras para la prueba de presión reducida de manera similar que, para la probeta de espectrometría, se cambió el recipiente cerámico por un recipiente de acero inoxidable de espesor muy delgado aprox. 1mm con la finalidad de obtener una solidificación lenta. Medidas aproximadas de 50mm de diámetro por 50mm de altura, ver Figura 22.



Figura 22. Recipiente de acero inoxidable usado para obtener las probetas para la prueba de presión reducida

El procedimiento de extracción de las probetas fue el siguiente; Se sumergió el recipiente de acero dentro del crisol durante 3min para tomar la temperatura del aluminio líquido. Se vertió aluminio líquido a 720°C en el recipiente directamente del horno como se aprecia en la Figura 23.



Figura 23. Extracción de probeta para la prueba de calidad de presión reducida

Se transportó el recipiente rápidamente hasta la máquina de presión reducida y se introdujo en el interior de la cámara de vacío, ver Figura 24.



Figura 24. Probeta de aluminio sobre la base de la cámara de vacío.

Se abrió la válvula para iniciar la prueba, con una presión de 25in de Hg, Figura 25, (importante no sobrepasar esta presión de vacío). La prueba se llevó a cabo durante 5 minutos. Al finalizar sólo se cerró la válvula para detener la prueba.



Figura 25. Indicador de presión de vacío con 25 pulgadas de mercurio

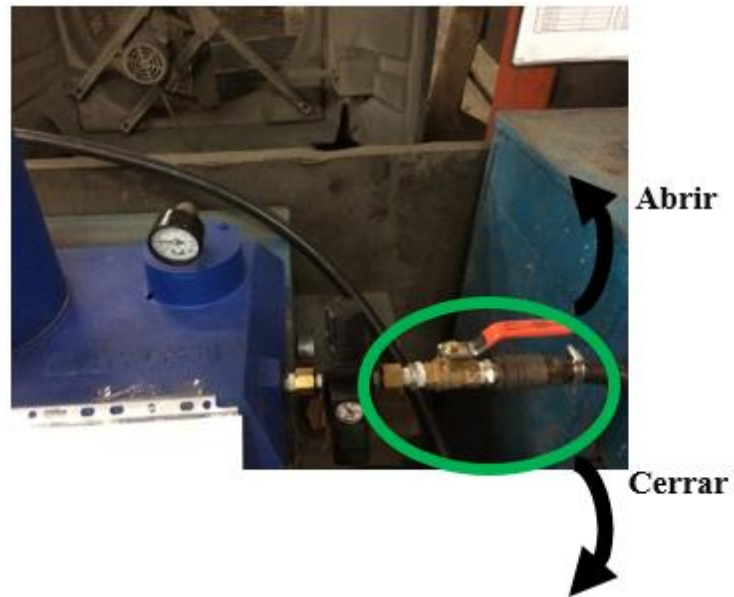


Figura 26. Inicio y termino de la prueba por medio de válvula de flujo

Una vez terminada la prueba, se abrió la cámara de vacío y se retiró del interior, Figura 27. La probeta se sacó del recipiente de acero con la ayuda de guantes de carnaza. Posteriormente se cortó la probeta por la mitad con una cierra cinta vertical como se muestra en la Figura 28.



Figura 27. Probeta retirada del recipiente de acero inoxidable



Figura 28. Cortando probeta en cierra cinta vertical



Figura 29. Probeta pulida y abrillantada lista para inspección visual

Se pulieron las caras planas iniciando con lija burda No. 120, después con lija fina No. 1200 y para obtener un acabado brillante se usó abrillantador hasta tener acabado espejo usando pulidora industrial neumática, Figura 29. Las probetas están listas para inspección visual.

4.6. Prueba de contenido de hidrogeno

Al finalizar el tratamiento del metal líquido, desgasificado y la prueba de presión reducida, se realizó un estudio de doce probetas de aluminio durante la producción (vaciado de piezas), se obtuvo una probeta cada quince minutos durante tres horas consecutivas con el mismo procedimiento de extracción utilizado para obtener las probetas de presión reducida como se explicó en el punto anterior, hasta que quedó $\frac{1}{3}$ parte de aluminio líquido de la capacidad del crisol, aproximadamente 200kg. Se enumeró del 1 al 12 para identificarlas.



Figura 30. Estudio de 12 probetas para el estudio de densidad de hidrogeno

Se pesó el volumen de agua destilada desplazada por la pieza al sumergirla en un vaso de precipitado, usando el método de Arquímedes se calculó la densidad de cada una de las doce probetas, Figura 31.



Figura 31. Método de Arquímedes para conocer la densidad

Al finalizar el estudio de densidad, se cortaron por la mitad con una sierra cinta vertical, Figura 28; una mitad de la probeta se utilizó para analizar crecimiento de grano y la otra mitad, Figura 32, se utilizó para revisar porosidad en el microscopio como se describe en el punto 4.7. Se enumeró del 1 al 12 las probetas para identificarlas. Figura 33.



Figura 32. Probeta cortada para análisis de porosidad

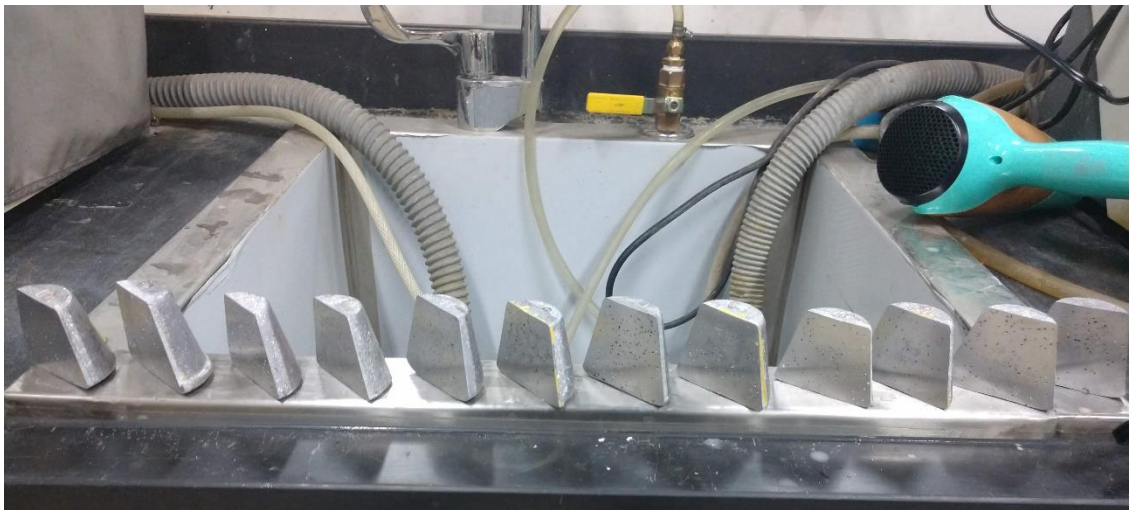


Figura 33. Las 12 probetas dónde se analizó la porosidad

4.7. Porosidad analizada en microscopio óptico

Se usó la mitad de la probeta para estudiar la evolución de la porosidad por gas con el uso de microscopio óptico.

El procedimiento para observar la porosidad fue el siguiente.

- Se pulió la superficie con lija de carburo de silicio No. 80, Figura 34.
- Se pulió la superficie con lija de carburo de silicio No. 800.
- Se pulió la superficie con lija de carburo de silicio No. 1200.
- Se enjuagó con agua corriente y secó con aire caliente.
- Se analizó la porosidad por gas en el microscopio óptico, Figura 35.



Figura 34. Pulido de probetas con distintas lijas



Figura 35. Microscopio óptico de 50X hasta 400

4.8. Macro ataque a probetas

Se utilizó la otra mitad de la probeta para realizar el ataque químico, fue necesario portar el equipo de protección personal básico como guantes de látex, bata de laboratorio, lentes de seguridad y campana extractora de gases.

El procedimiento para revelar la macroestructura fue el siguiente.

- Se pulió la superficie con lija de carburo de silicio No. 80 para dar planicidad a la cara. Figura 34.
- Se pulió la superficie con lija de carburo de silicio No. 800.
- Se preparó una solución de ataque al 20% en peso de sulfato cúprico (CuSO_4), se usó agua destilada para prepararla, se pesó 20g CuSO_4 y 80g de agua. Figura 36. Se mezcló en un recipiente de vidrio. Figura 37.
- Se preparó una solución de limpieza 6:1 de ácido nítrico concentrado (HNO_3) y ácido fluorhídrico concentrado (HF) en un recipiente de plástico. Figura 38
- Se sumergió la superficie de la probeta en la solución de ataque durante 8s (se forma una capa de cobre sobre la superficie de ataque).
- Se enjuagó con agua corriente. Figura 40
- Se sumergió la superficie en la solución de limpieza durante 5s.
- Se enjuagó con agua corriente. Figura 42
- Se secó con aire caliente.
- Probeta lista para analizar macro estructura. Figura 43.



Figura 36. Peso del CuSO₄ lado izquierdo y peso del agua lado derecho



Figura 37. Solución de ataque, CuSO₄

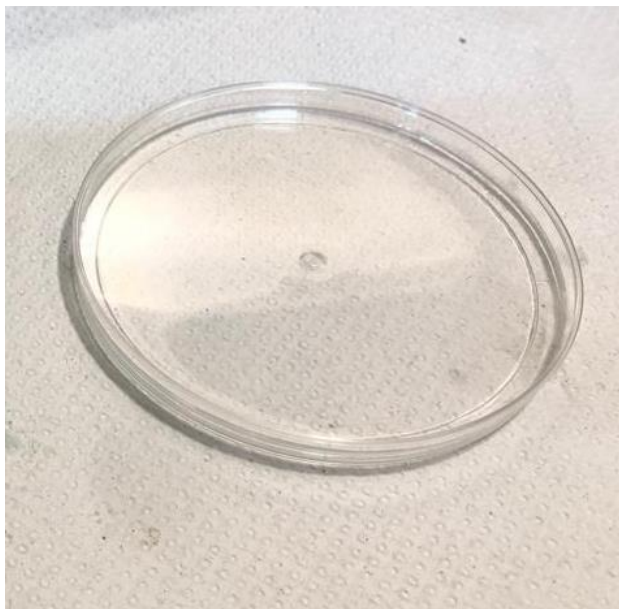


Figura 38. Solución de limpieza, HNO_3 y HF

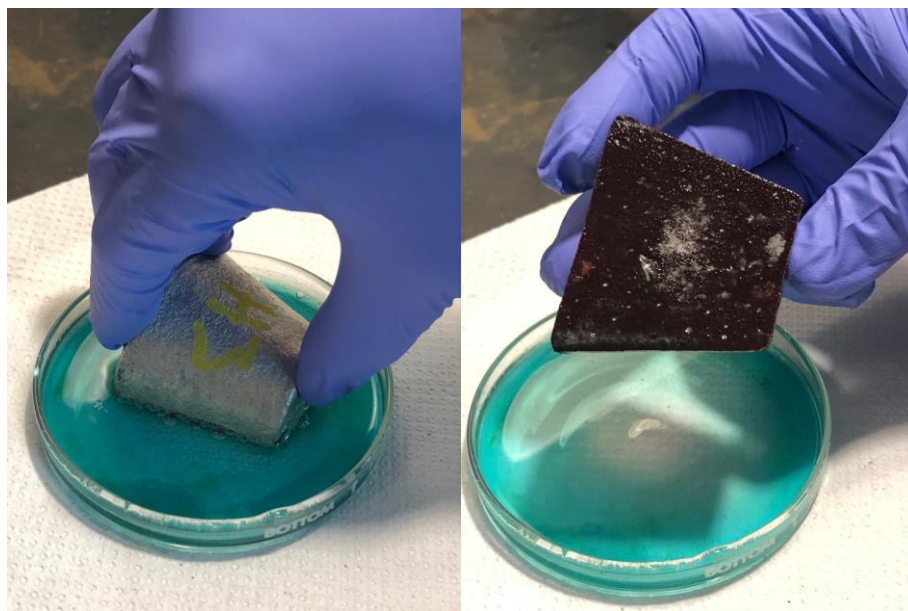


Figura 39. Atacando probeta en solución de CuSO_4



Figura 40

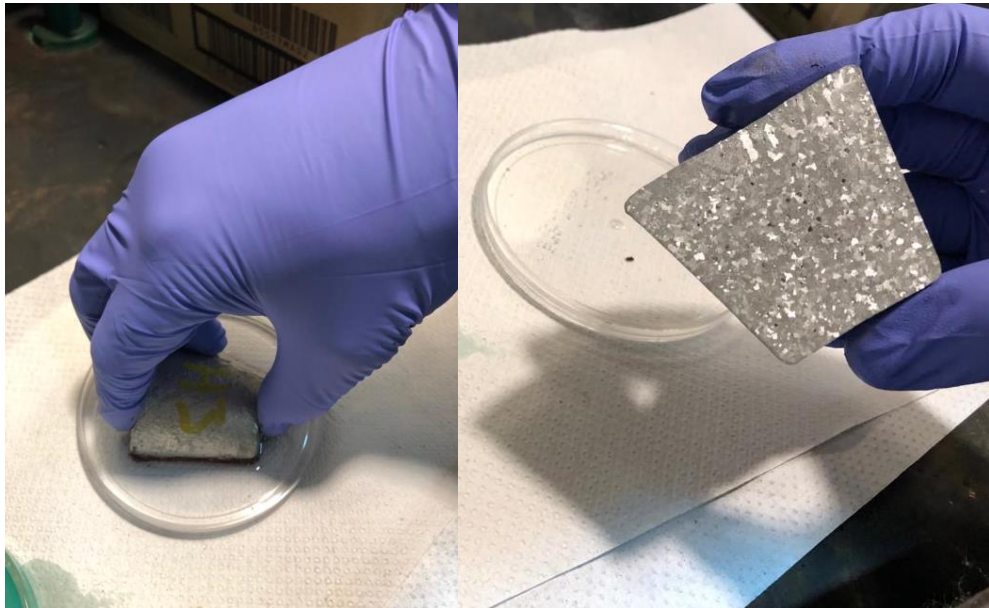


Figura 41. Enjuagando probeta en solución de limpieza



Figura 42. Enjuagando probeta después de solución de limpieza

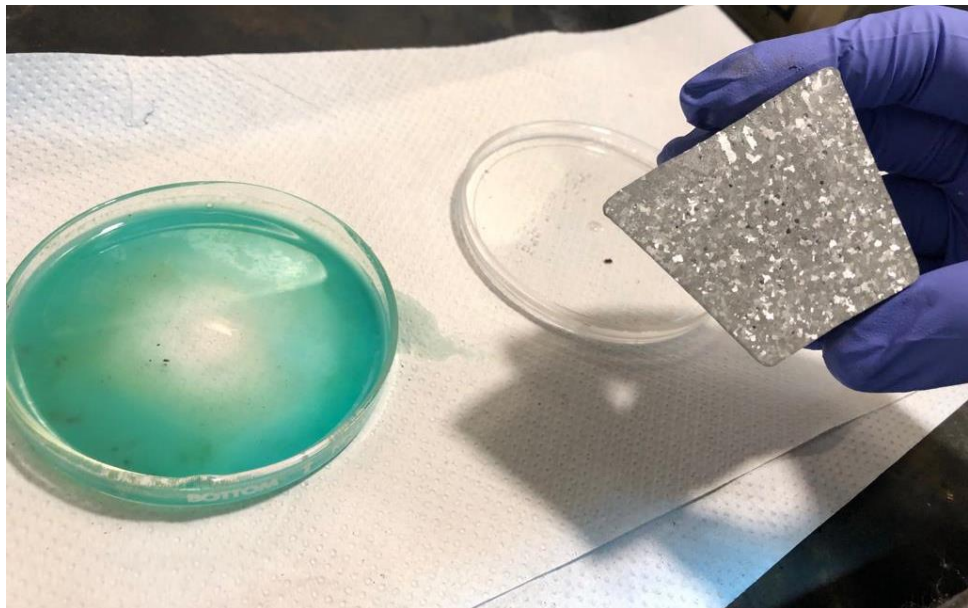


Figura 43. Probeta con macro estructura revelada

4.9. Diseño del sistema de alimentación en Solid Works

Se consiguió el CAD del casting con extensión .stp, ver Figura 44 y Figura 45. Este archivo se exportó con una extensión .STL y se realizó una primera simulación llamada “naked simulation” usando SolidCast8 como se muestra en el punto 4.10. Solo se llevó a cabo la solidificación para determinar las zonas de contracción y puntos calientes.

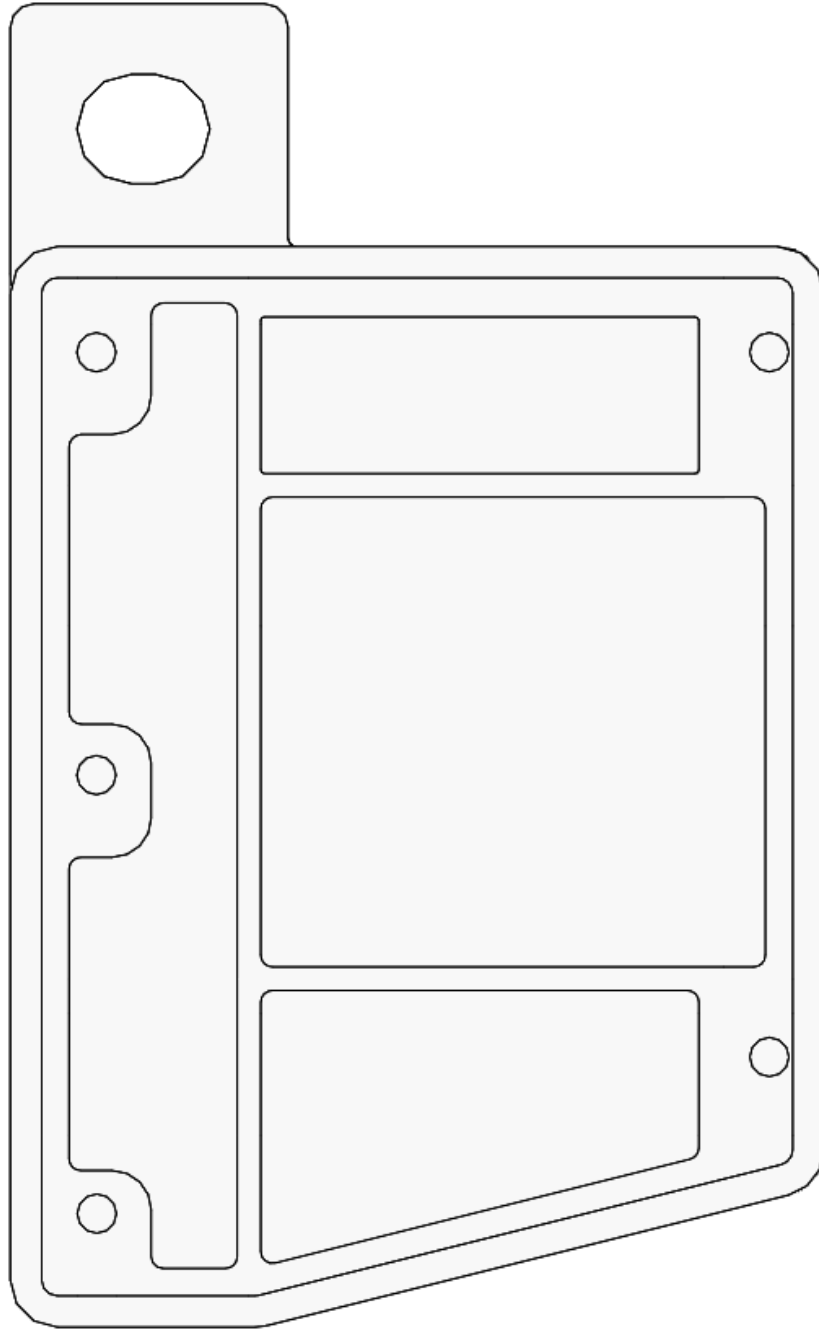


Figura 44. Vista frontal porta plancha 300

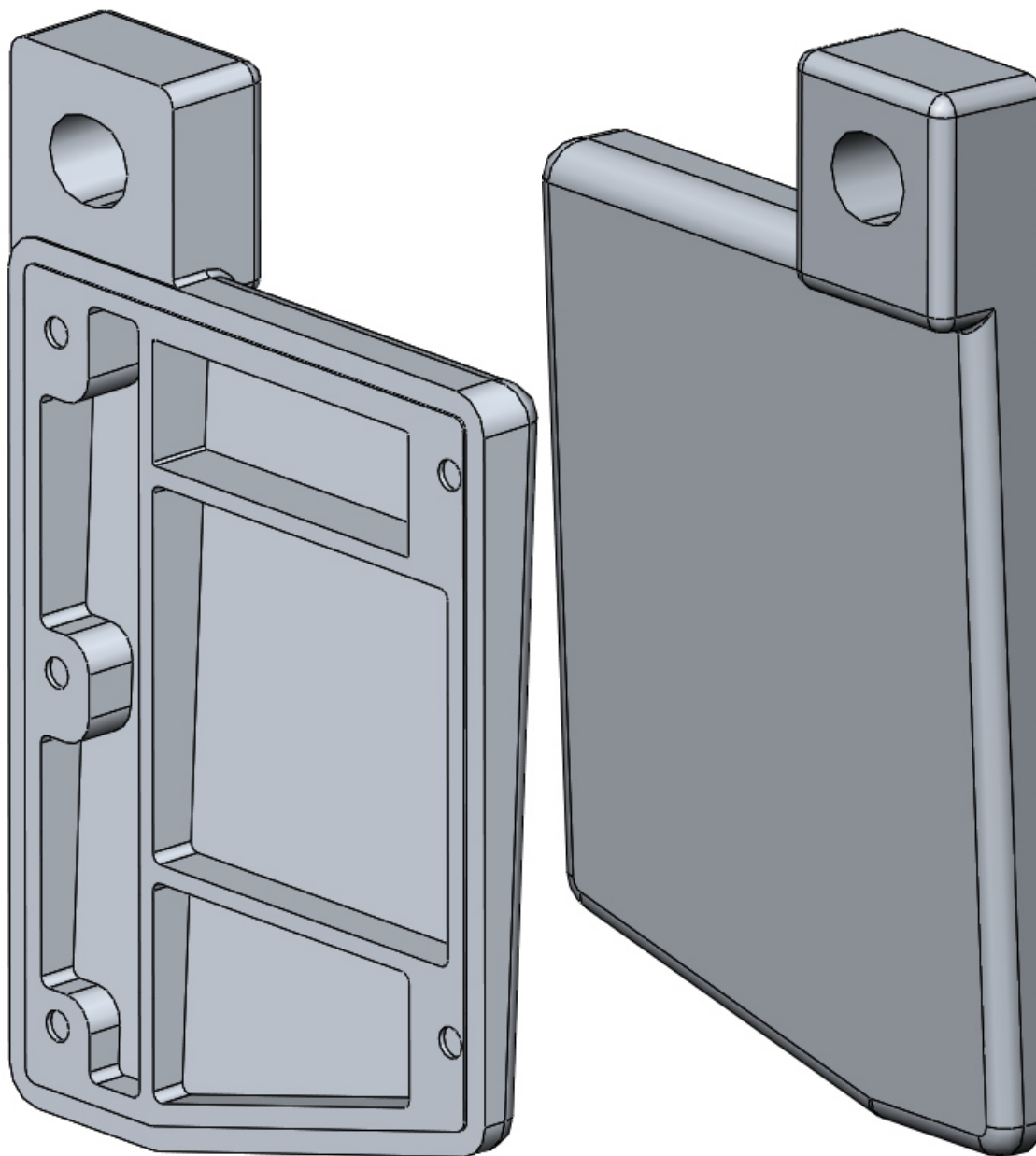


Figura 45. Vista en proyección isométrica de porta plancha 300

Posteriormente, se tomaron medidas físicas del molde permanente para dibujar y anexar el sistema de alimentación actual al modelo 3D tal y cómo lo tenía la empresa antes de iniciar el presente estudio. Figura 46 y Figura 47

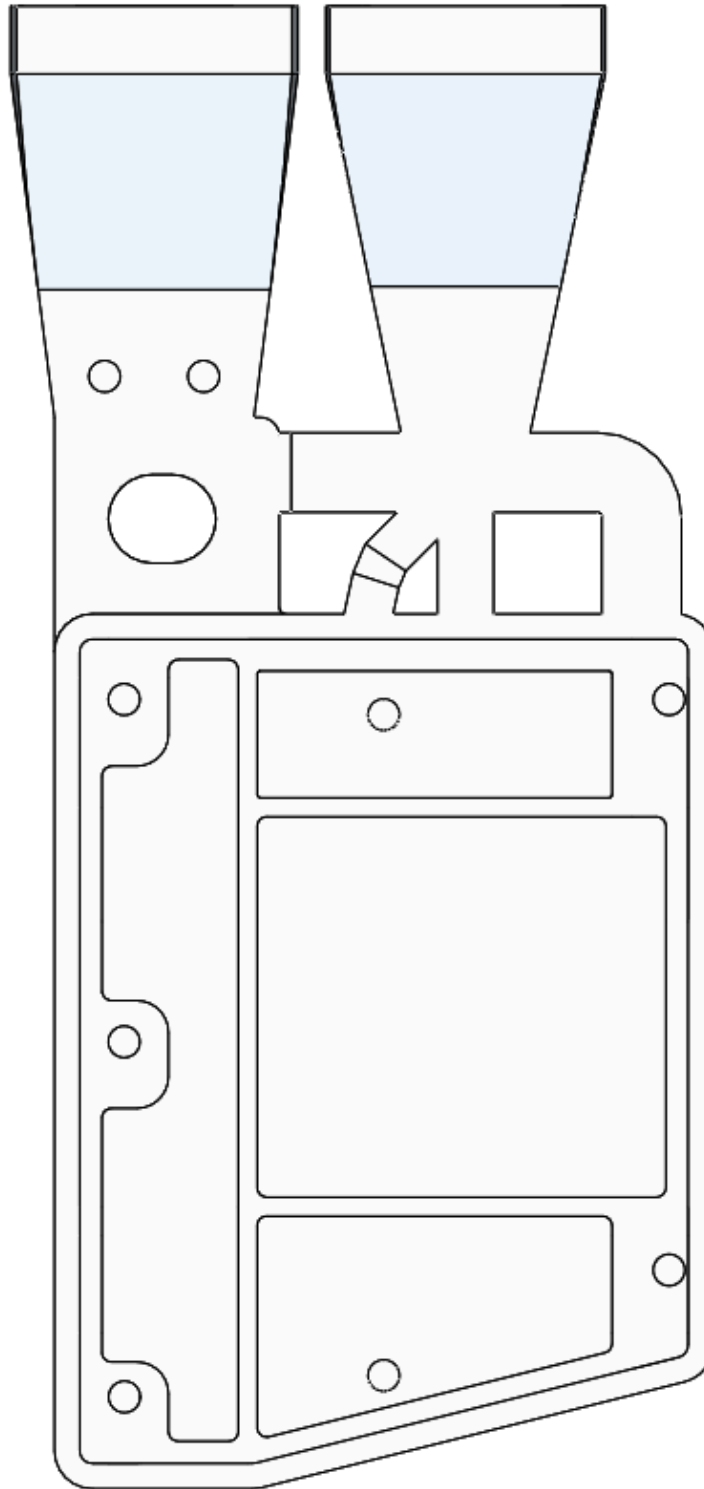


Figura 46. Diseño del sistema de alimentación del caso actual

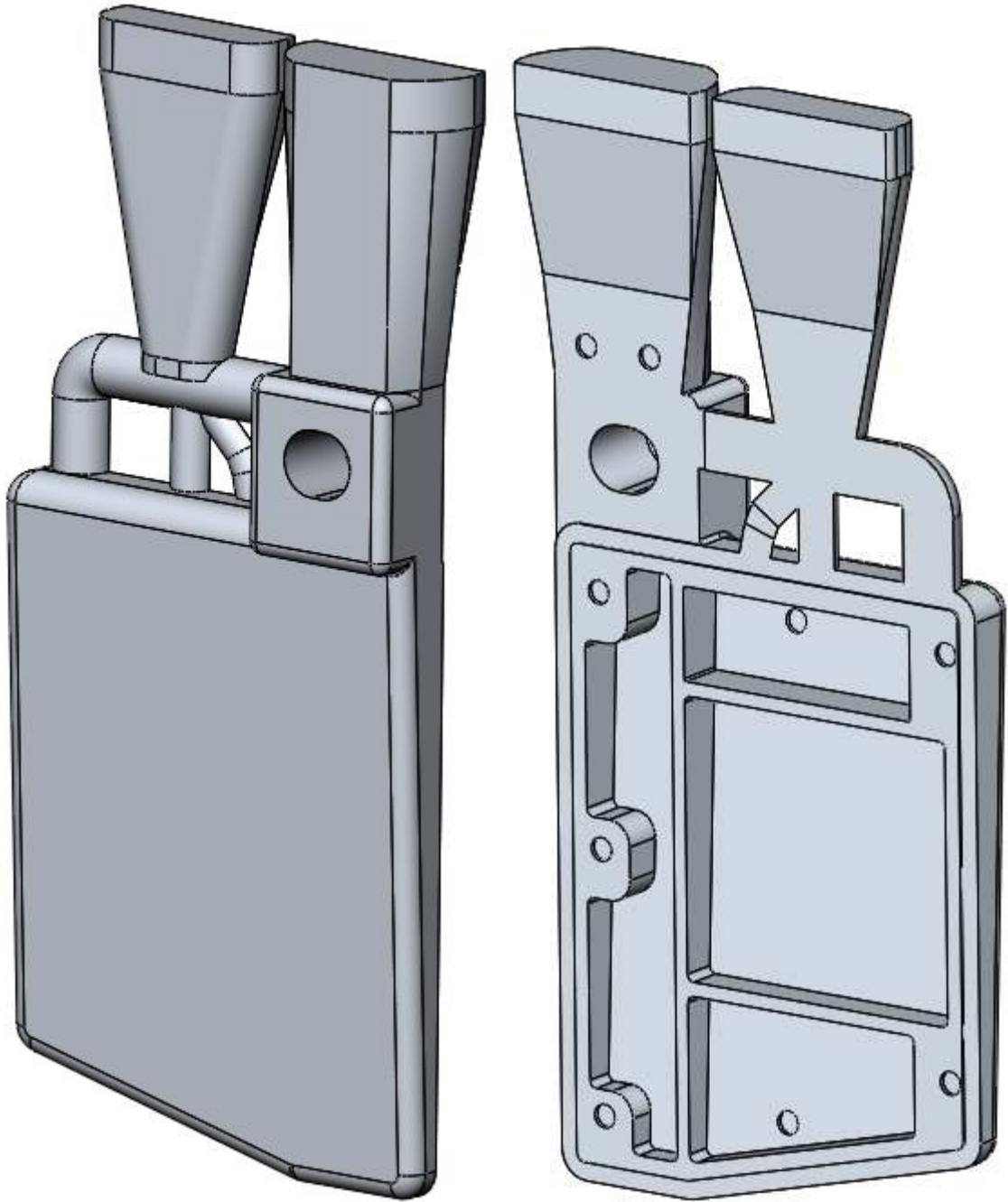


Figura 47. Diseño del sistema de alimentación del caso actual, vista isométrica

Se realizó una segunda simulación, pero esta vez de llenado de fluido para validar y reproducir el llenado actual del molde. Ver punto 4.10.

Para el nuevo diseño del sistema de alimentación se partió del casting con dimensiones y acabados finales, se tomó en cuenta la contracción de la aleación y se analizó los cambios de sección, espesores, zonas con mayor masa y geometrías que pudieran ser concentradores de calor para determinar la ubicación de las mazarotas y de los ataques. Se consideró como la mejor opción continuar fabricando esta pieza en molde permanente debido a la alta productividad de la misma.

Se realizaron distintas propuestas de diseños, Figura 48 y Figura 49, con cada uno se realizó una simulación para optimizar el diseño, se optó por el sistema de alimentación que presentó los mejores resultados en la simulación.

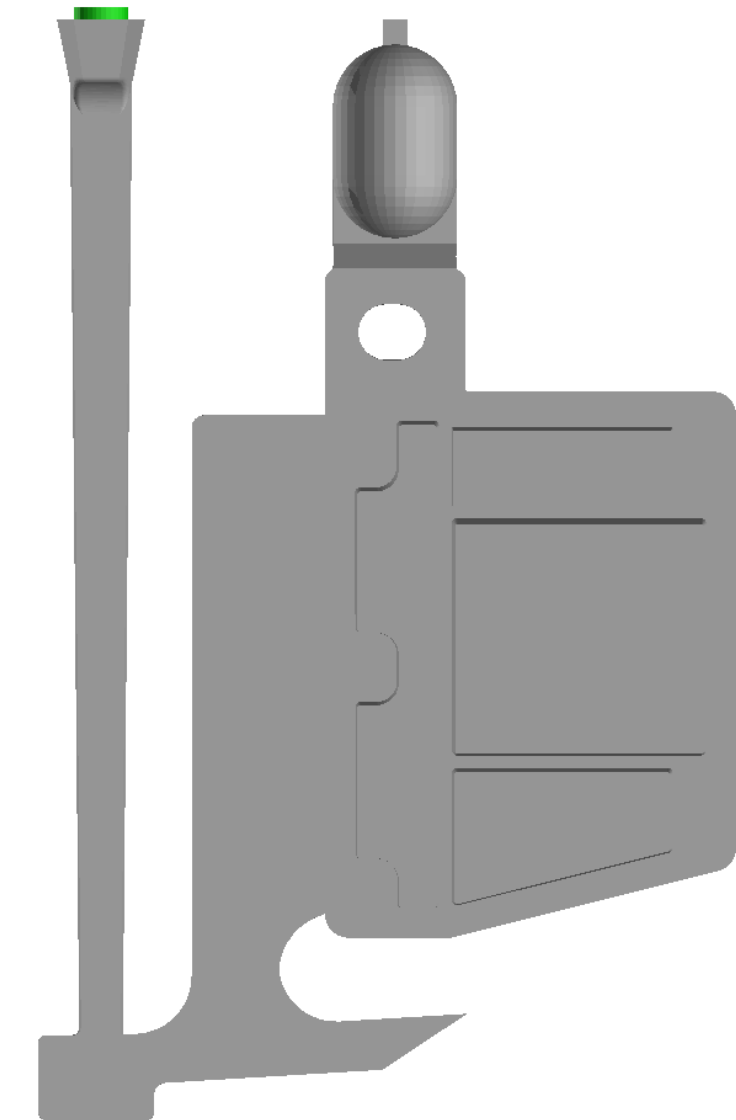


Figura 48. Propuesta diseño de sistema de alimentación 1A

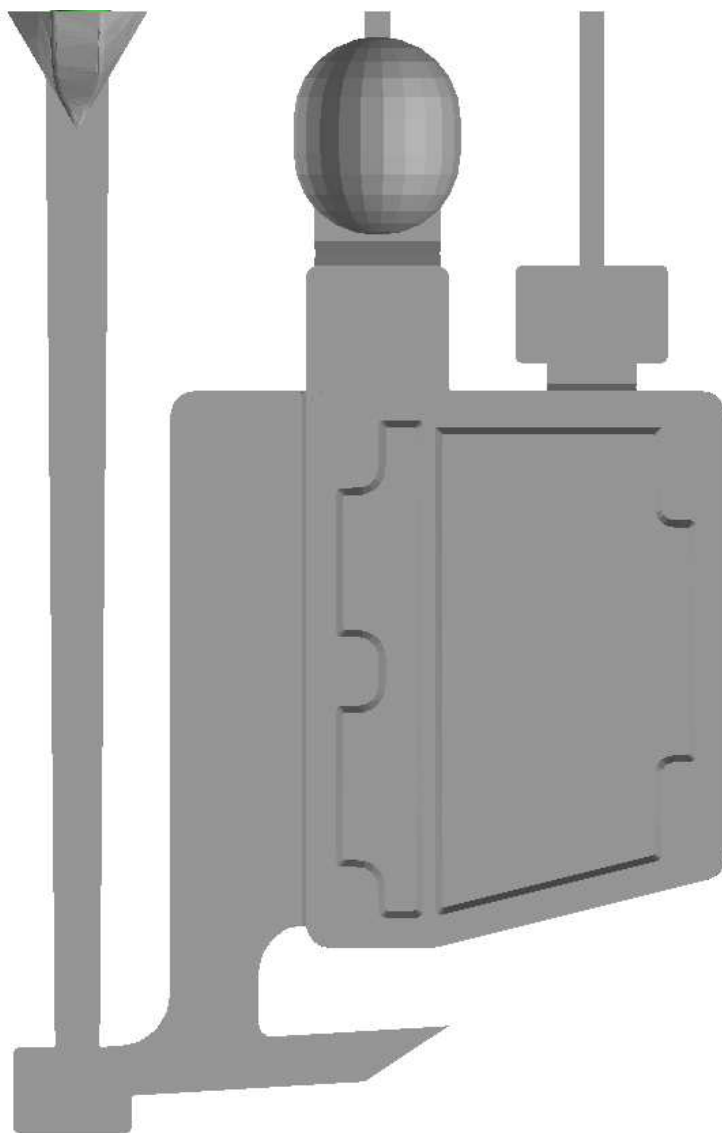


Figura 49. Propuesta diseño de sistema de alimentación 1B

4.10. Simulación en software SolidCast8

Las simulaciones se llevaron a cabo en el software de simulación SolidCast8 partiendo de un archivo .STL exportado desde el software de diseño, Figura 50.

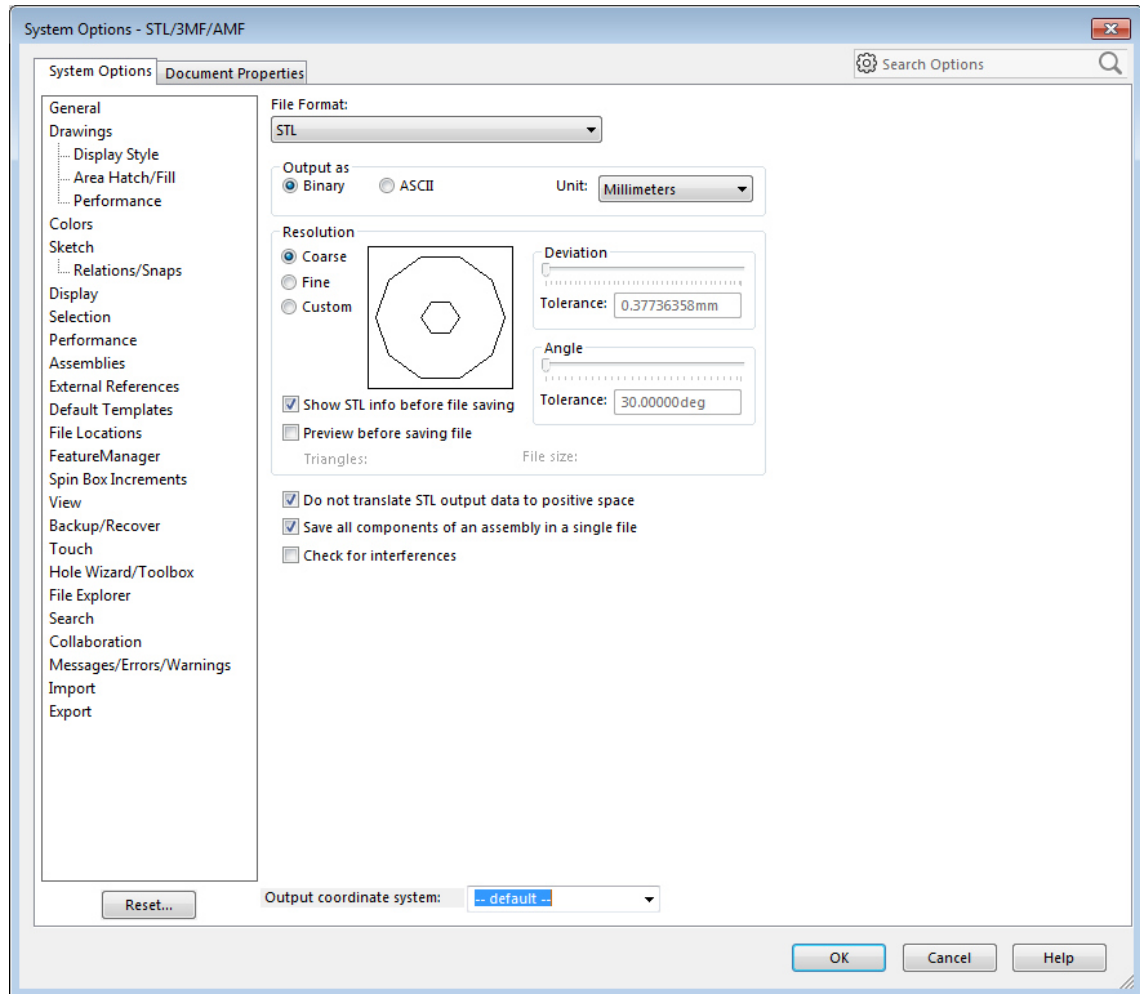
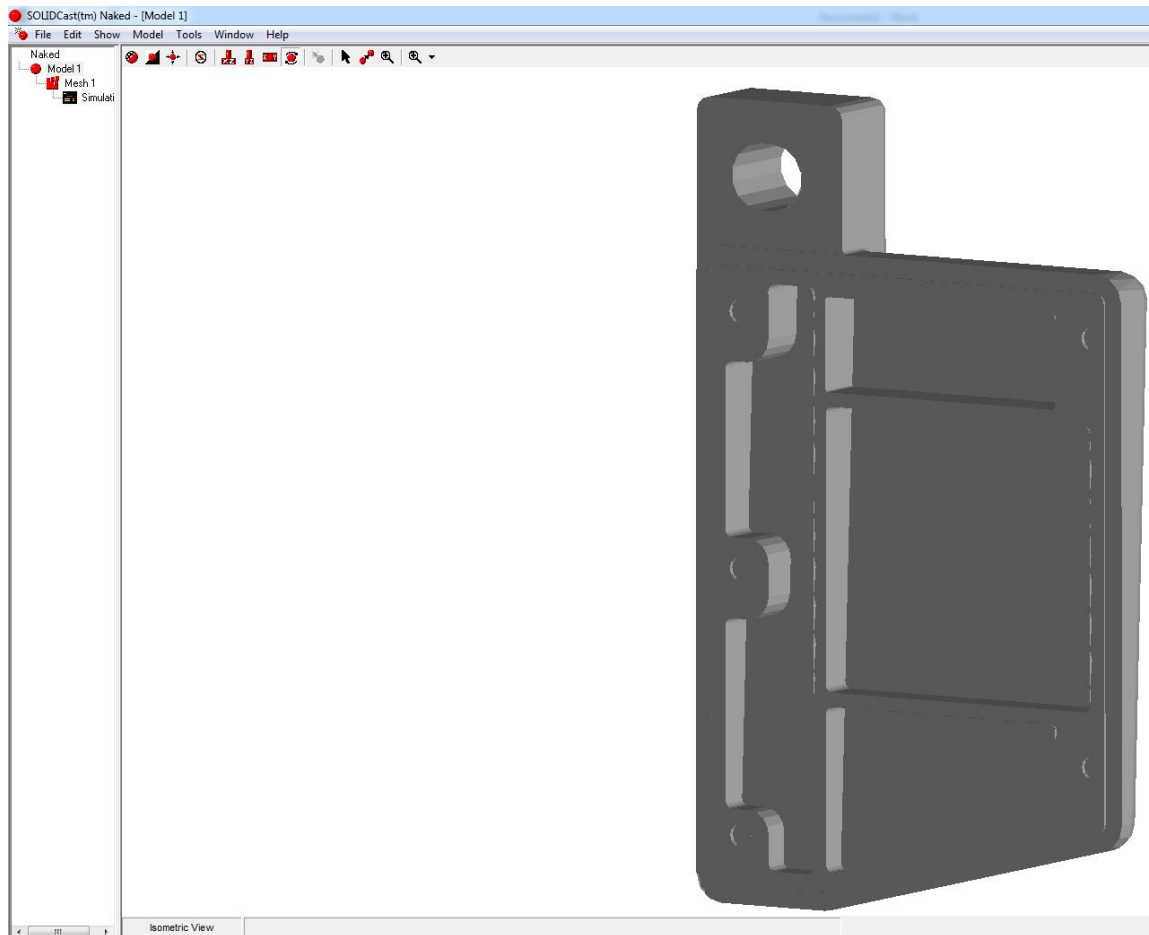


Figura 50. Exportar con extensión STL desde Solid Works

4.10.1. Simulación burda

Inicialmente se realizó una “naked simulation” esto quiere decir una simulación de la solidificación de la aleación.



Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

From DB... To DB...

	Al 356.0	
Thermal Conductivity	159.12	W/m-K
Specific Heat	962.3	J/kg-k
Density	2684.62	kg/m ³
Initial Temperature	720	C
Solidification Temperature	542	C
Freezing Range	71	C
Latent Heat of Fusion	388175.1	J/kg

Close

Create Mesh

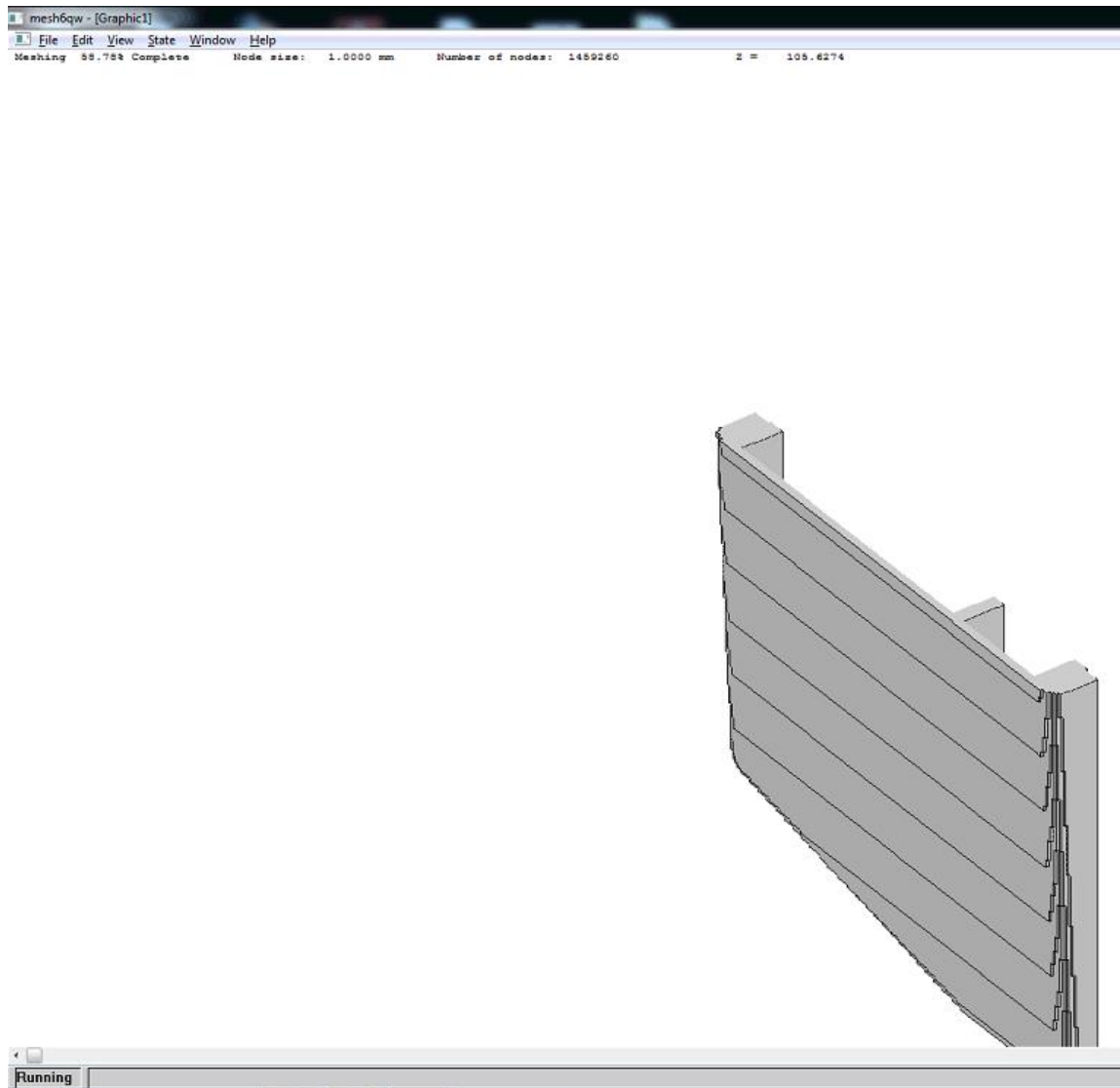
Mesh Name Mesh 2

☒ Number of Nodes

☐ Node Size

Mold Type
None

OK Cancel



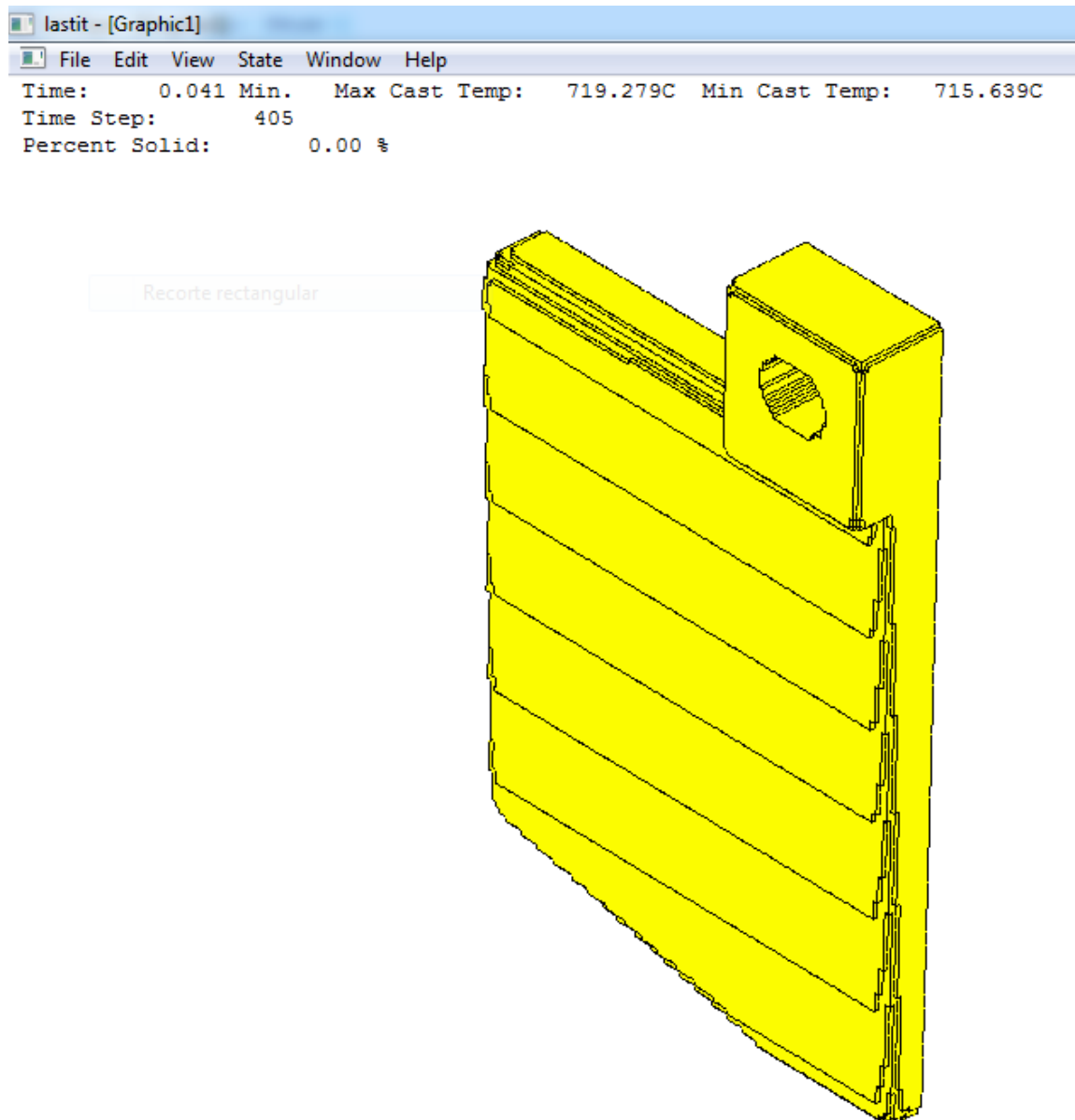
Start Simulation

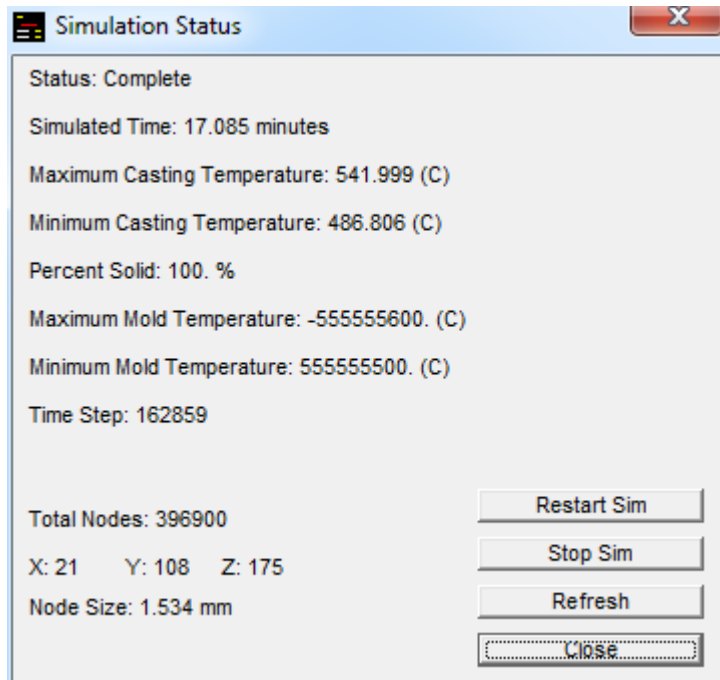
Simulation Name:

Simulation Type
☒ Single-Cycle
☐ Permanent Mold

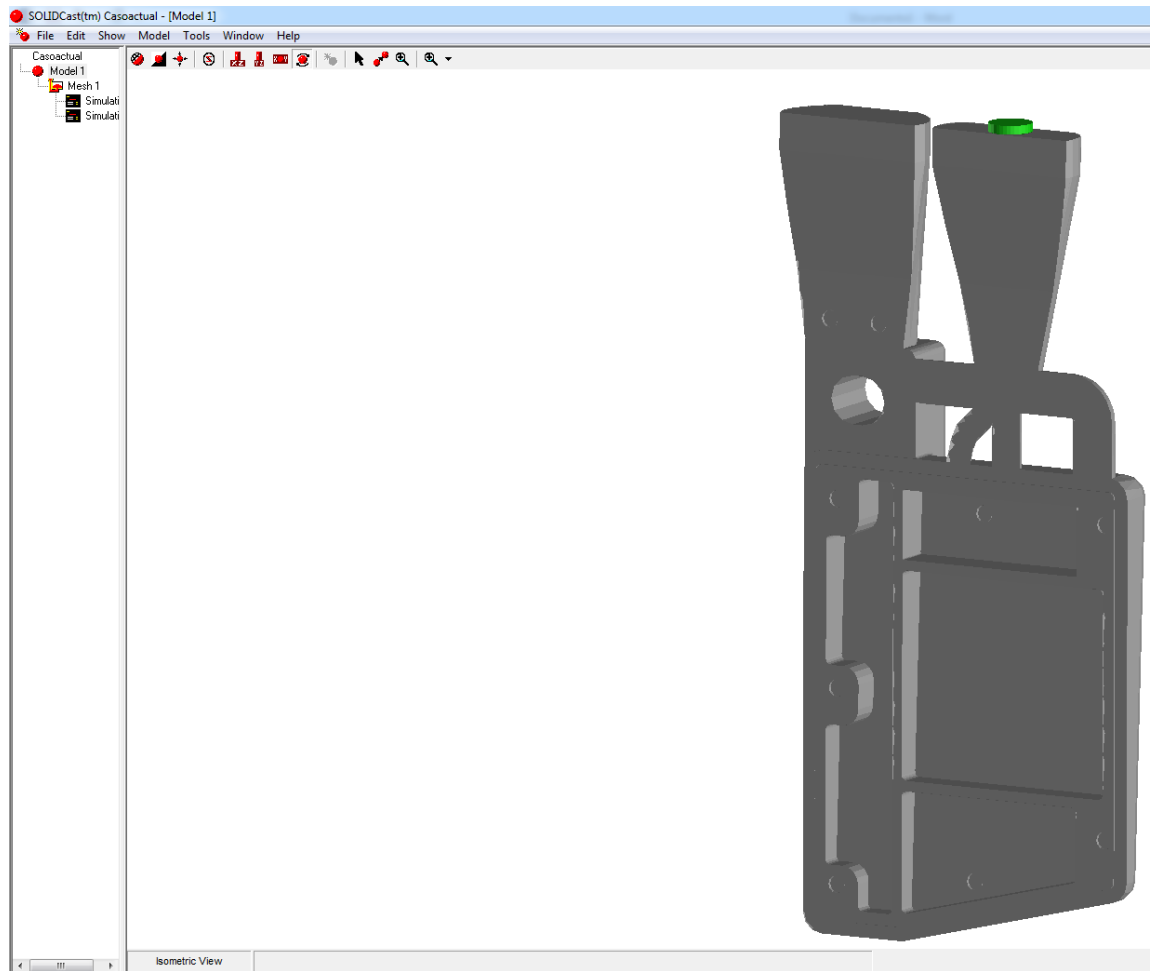
Stop When:

☐ Run View Factor Before Simulating





4.10.2. Simulación de caso actual



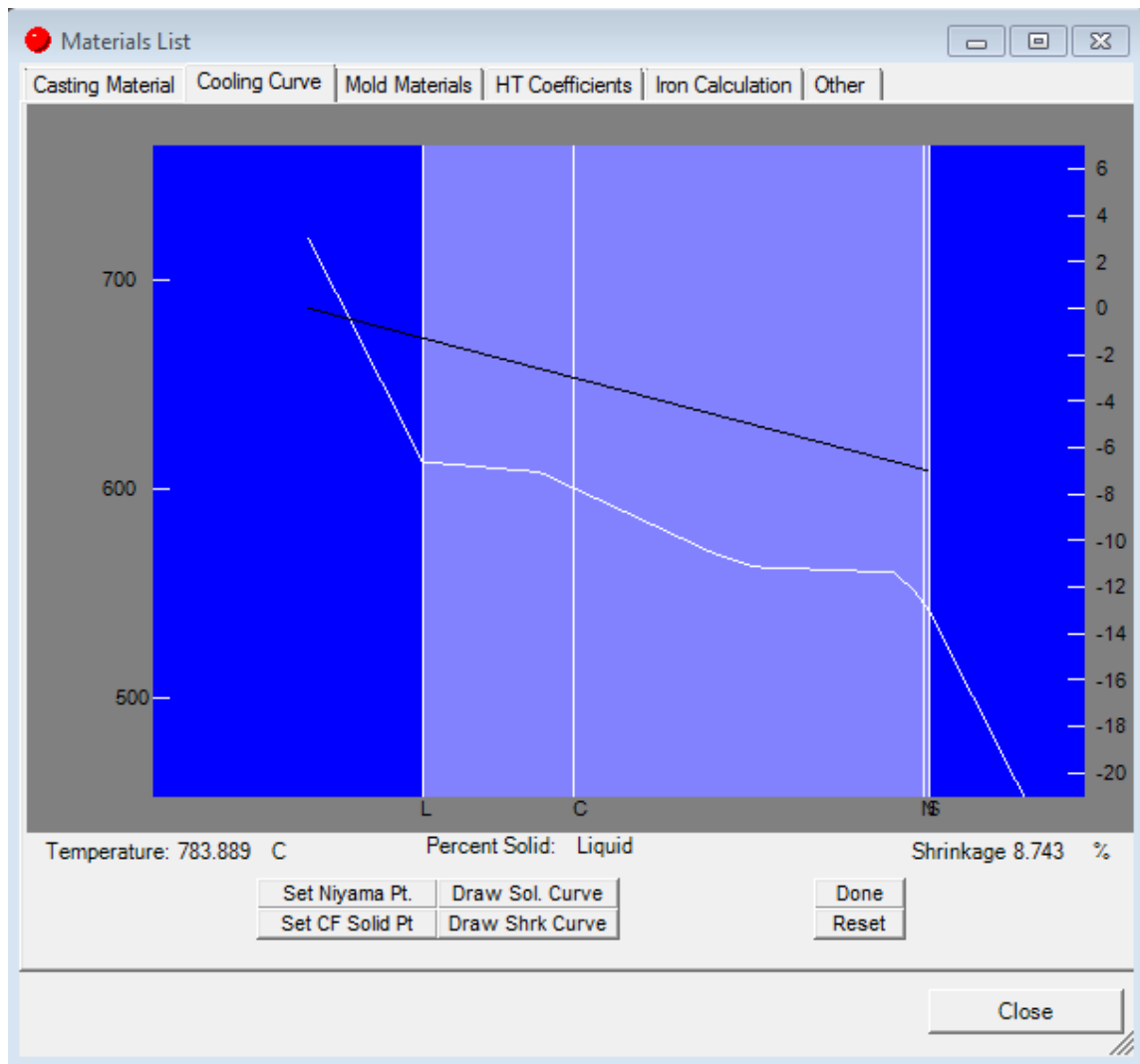
Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

From DB... To DB...

	Al 356.0	
Thermal Conductivity	159.12	W/m-K
Specific Heat	962.3	J/kg-k
Density	2684.62	kg/m ³
Initial Temperature	720	C
Solidification Temperature	542	C
Freezing Range	71	C
Latent Heat of Fusion	388175.1	J/kg

Close



Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

New Delete

Silica Sand
Cast Iron
Exo Sleeve
New Material 1
Filter

Material Name: Cast Iron Material Type: Normal Mold

InitialTemp: 250 C

Thrm Cond: 44.97 W/m-K

Spc Ht: 460.24 J/kg-k

Density: 7842.413 kg/m³

From DB To DB

Close

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

External Heat Transfer Coefficient W/m²-K

☒ Use Internal Heat Transfer Coefficients

Casting Material	Riser Material
Riser Material	Ambient
Ambient	Silica Sand
Silica Sand	Cast Iron
Cast Iron	Exo Sleeve
Exo Sleeve	New Material 1
New Material 1	Filter
Filter	

W/m²-K

Close

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

External Heat Transfer Coefficient W/m²-K

☒ Use Internal Heat Transfer Coefficients

Casting Material	Riser Material
Riser Material	Ambient
Ambient	Silica Sand
Silica Sand	Exo Sleeve
Exo Sleeve	Cast iron 2 pintado
Cast iron 2 pintado	Cast Iron
Cast Iron	

W/m²-K

Close

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

Ambient Temperature °C

Pour Time sec

Close

Create Mesh

Mesh Name

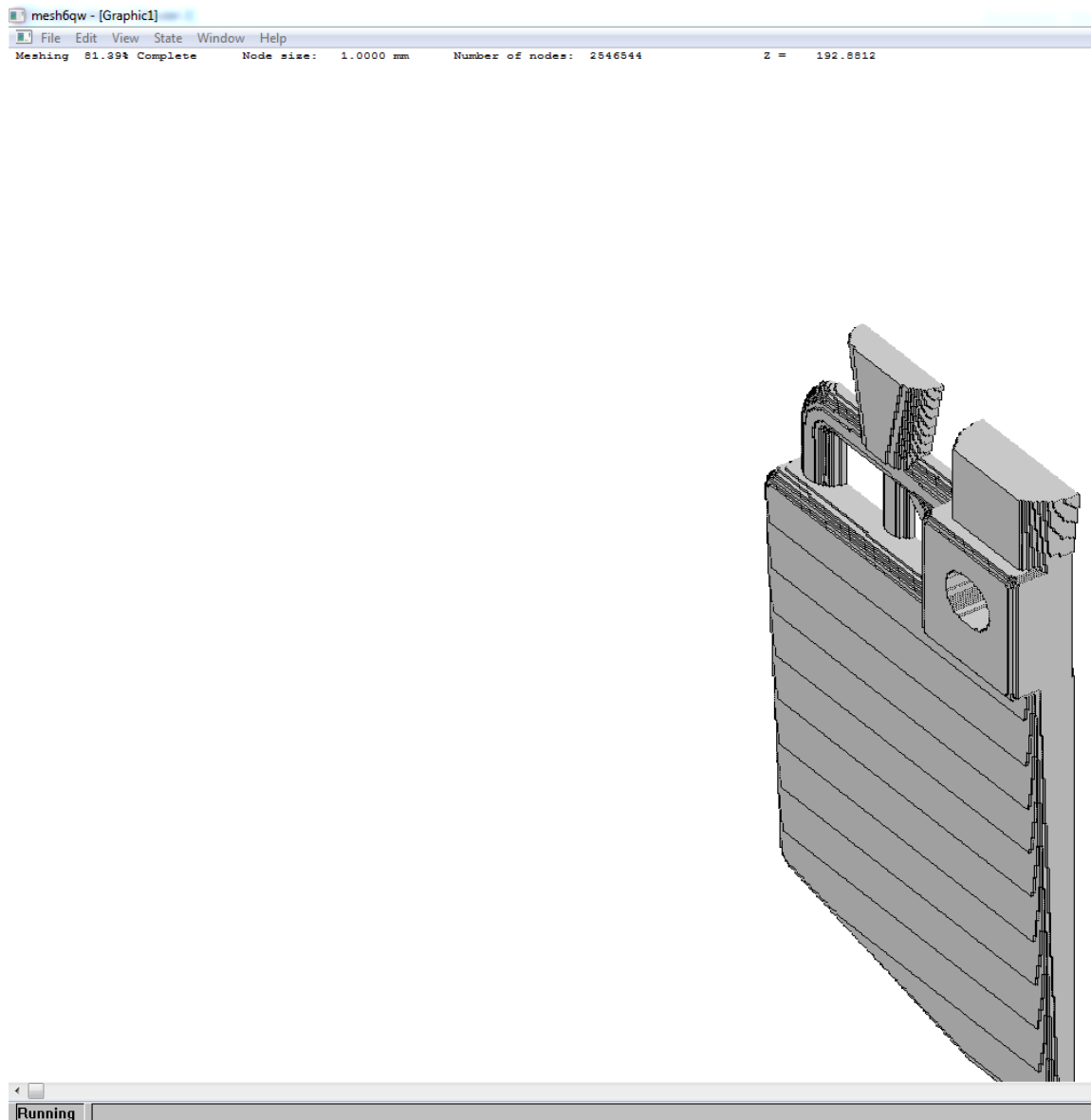
☐ Number of Nodes

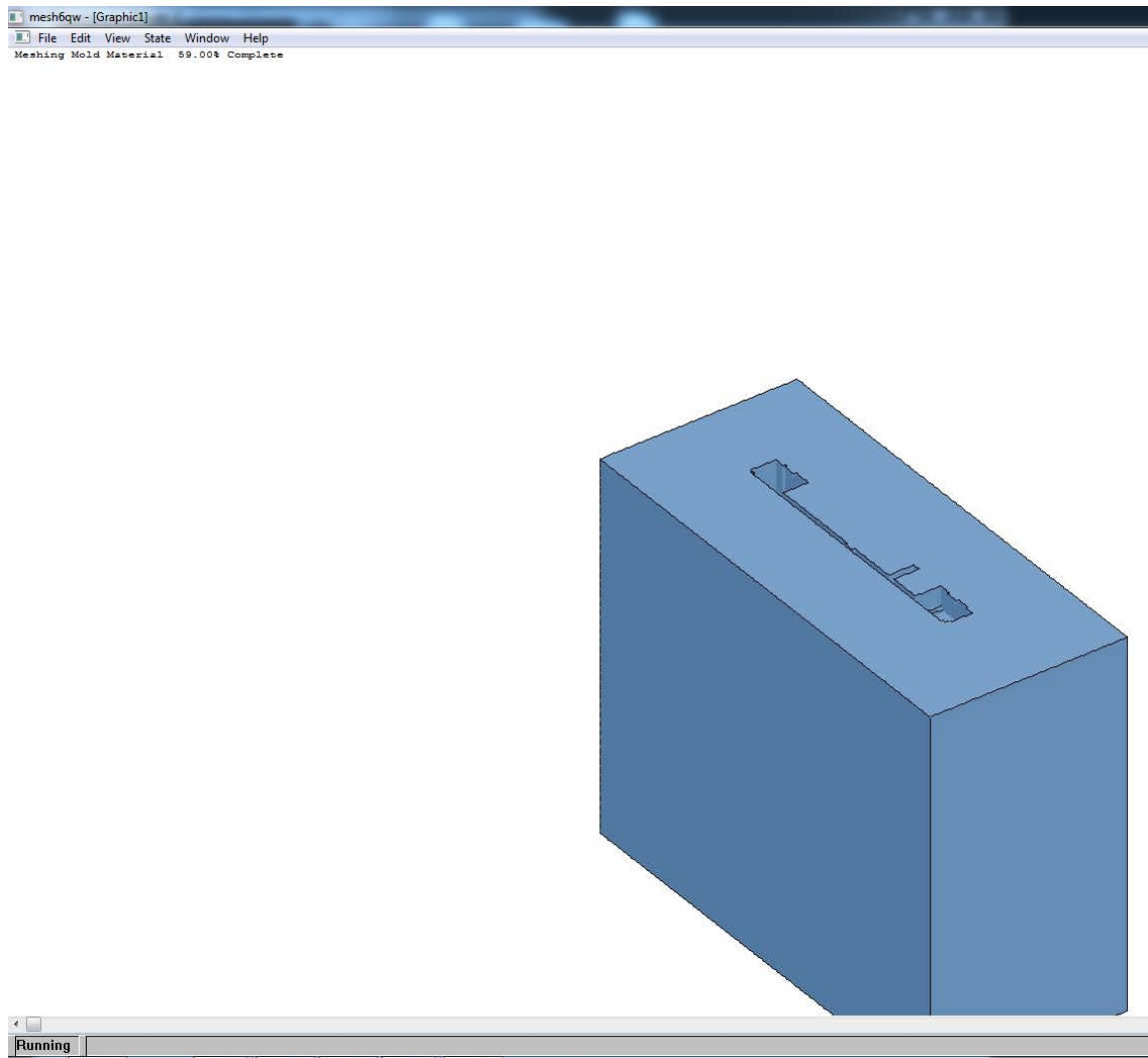
☒ Node Size mm

Mold Type Mold Material Mold Thickness (mm)

☒ Mold Open Top

OK Cancel





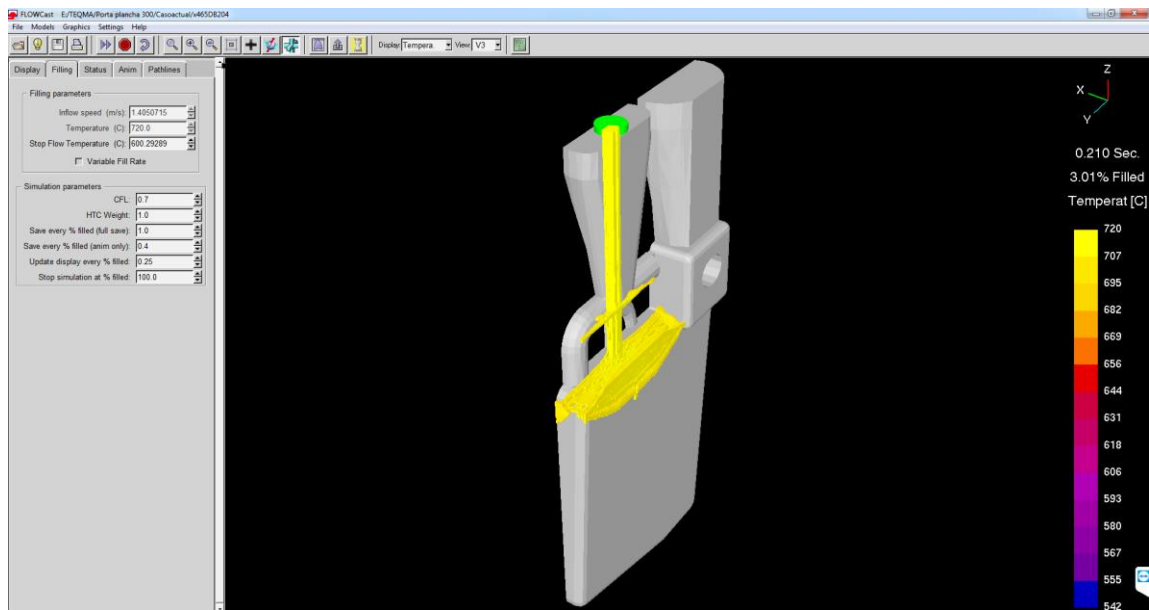
Start Simulation

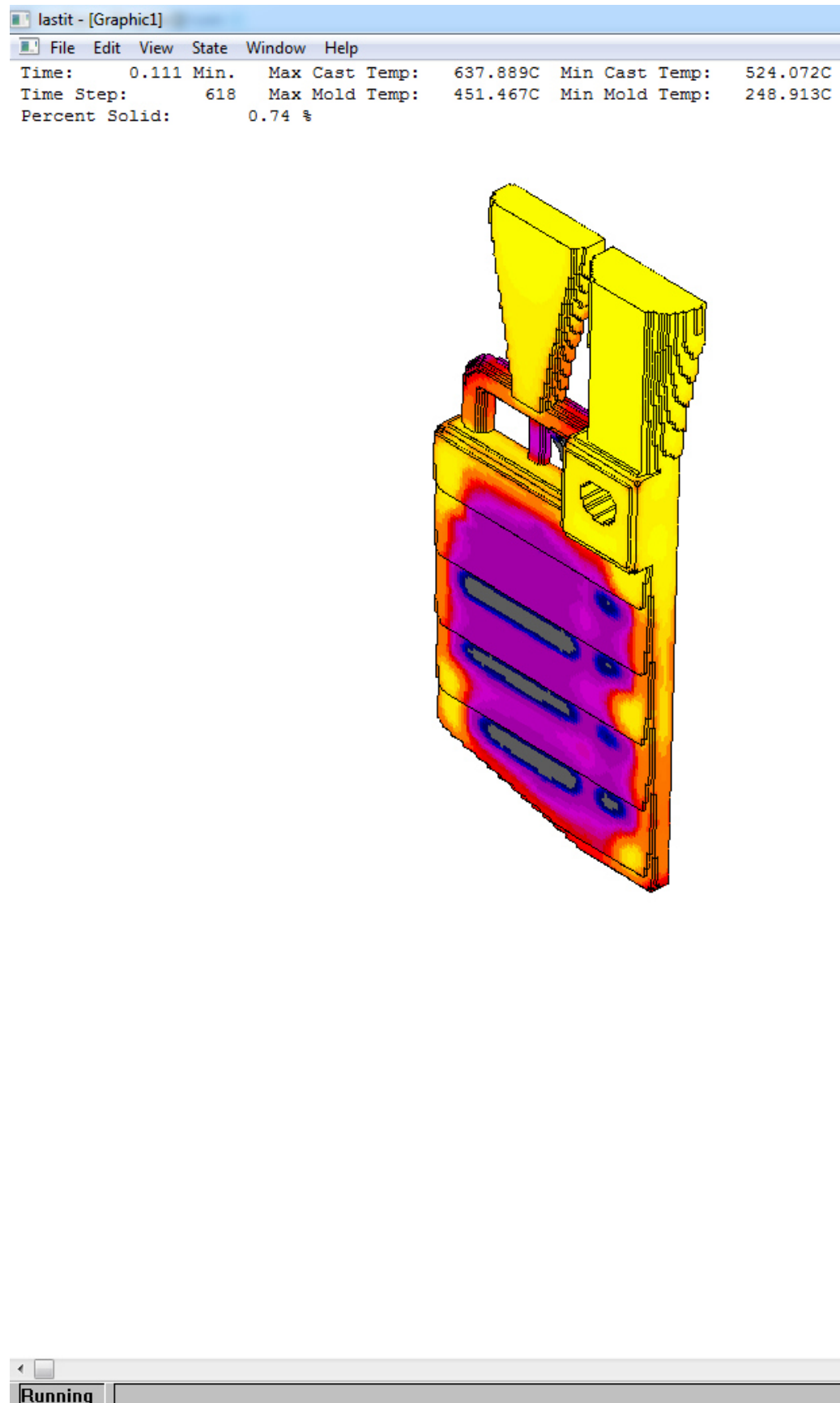
Simulation Name:

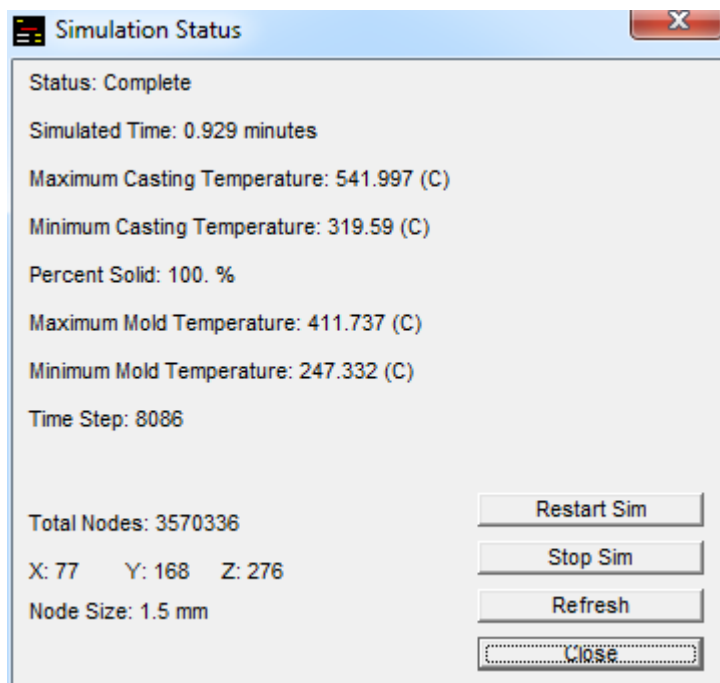
Simulation Type
☒ Single-Cycle
☐ Permanent Mold

Stop When:

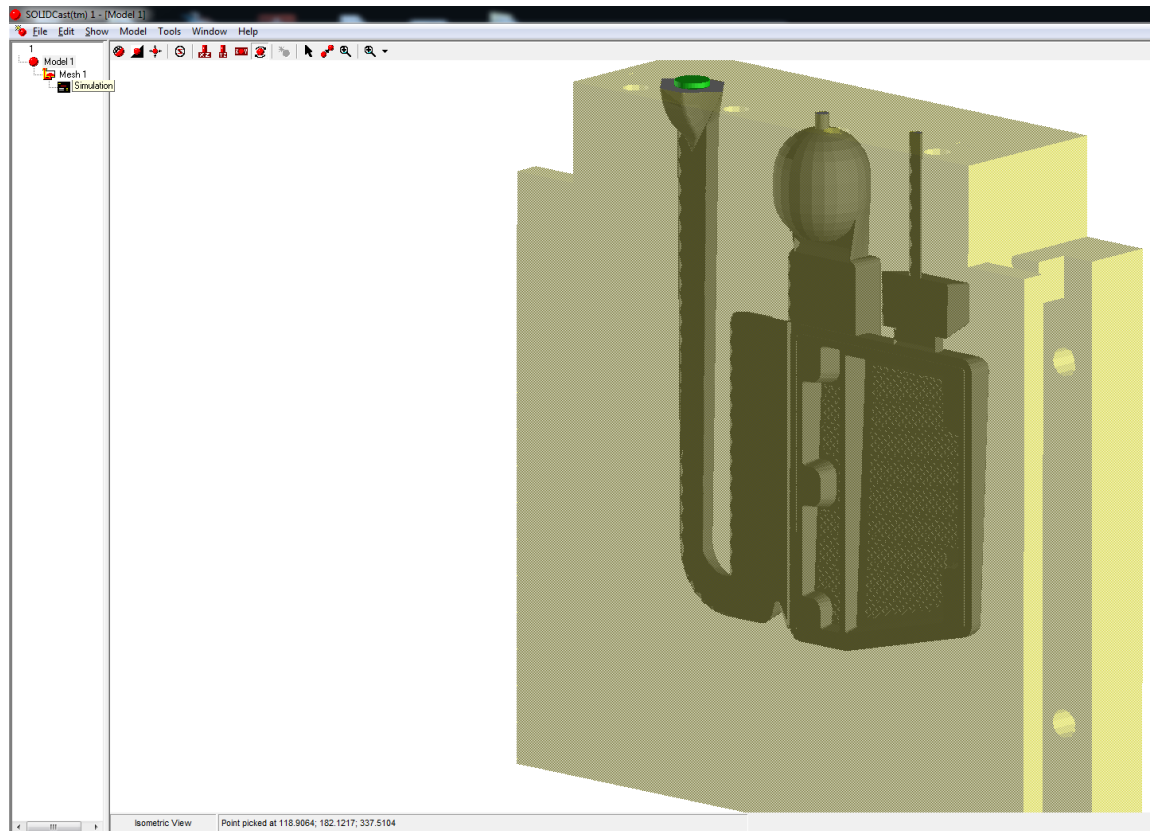
☐ Run View Factor Before Simulating







4.10.3. Simulación de caso propuesto



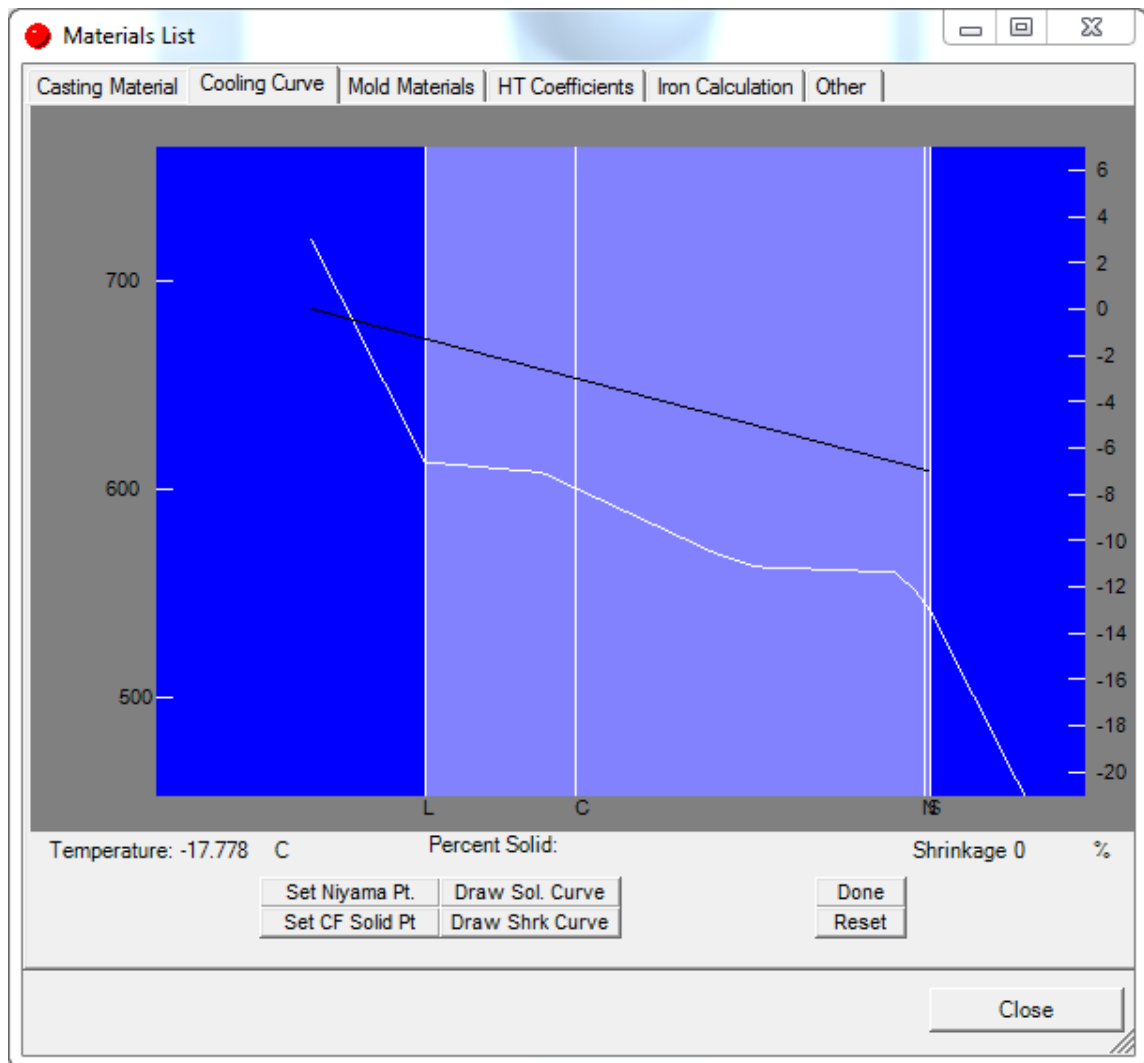
Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

From DB... To DB...

	Al 356.0	
Thermal Conductivity	159.12	W/m-K
Specific Heat	962.3	J/kg-k
Density	2684.62	kg/m ³
Initial Temperature	720	°C
Solidification Temperature	542	°C
Freezing Range	71	°C
Latent Heat of Fusion	388175.1	J/kg

Close



Materials List

Casting Material | Cooling Curve | **Mold Materials** | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

Material Name: Material Type:

InitialTemp: °C

Thrm Cond: W/m-K

Spc Ht: J/kg-k

Density: kg/m³

Materials List:

- Silica Sand
- Cast Iron**

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

External Heat Transfer Coefficient W/m ^ 2-K

☒ Use Internal Heat Transfer Coefficients

Casting Material	Riser Material
Riser Material	Ambient
Ambient	Silica Sand
Silica Sand	Cast Iron
Cast Iron	

W/m ^ 2-K

Close

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

External Heat Transfer Coefficient W/m²-K

☒ Use Internal Heat Transfer Coefficients

Casting Material	Riser Material
Riser Material	Ambient
Ambient	Silica Sand
Silica Sand	Cast Iron
Cast Iron	

W/m²-K

Close

Materials List

Casting Material | Cooling Curve | Mold Materials | HT Coefficients | Iron Calculation | Other

Ambient Temperature °C

Pour Time sec

Close

Create Mesh

Mesh Name

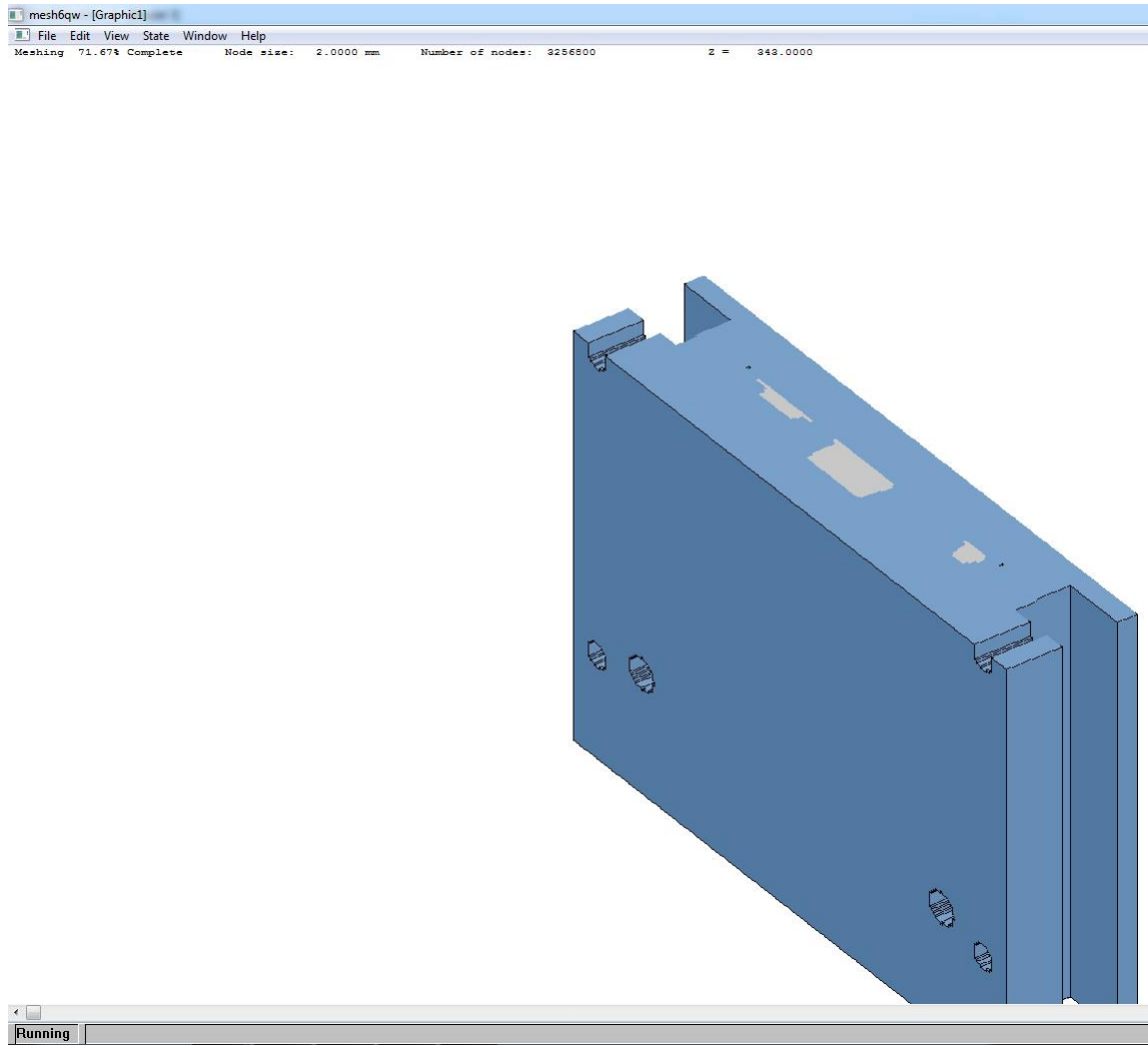
☐ Number of Nodes

☒ Node Size mm

Mold Type

▼

OK Cancel



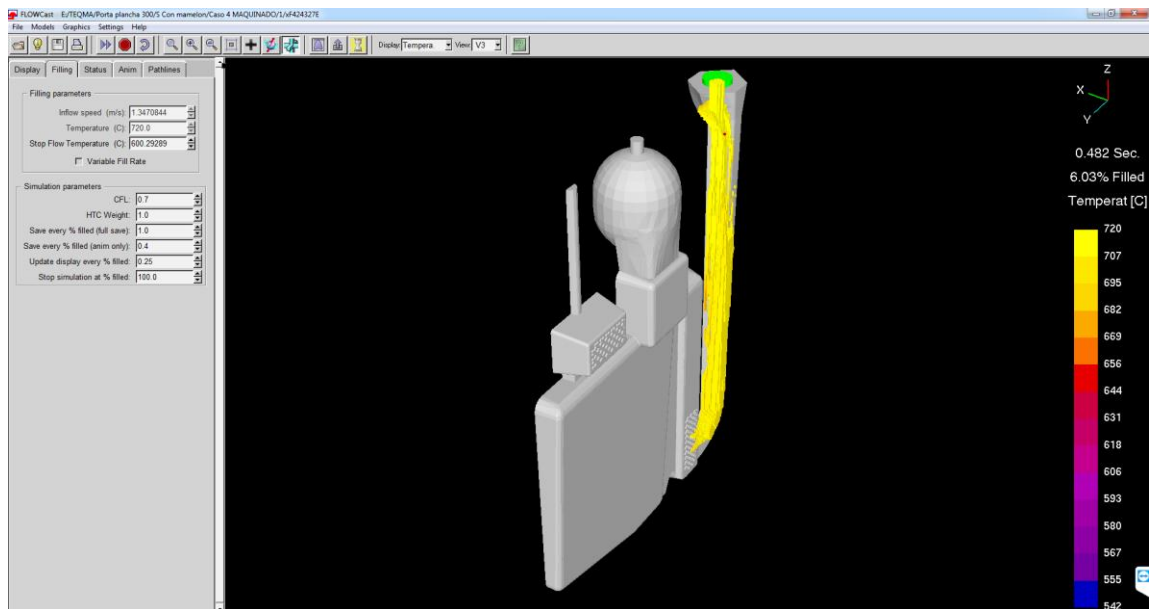
Start Simulation

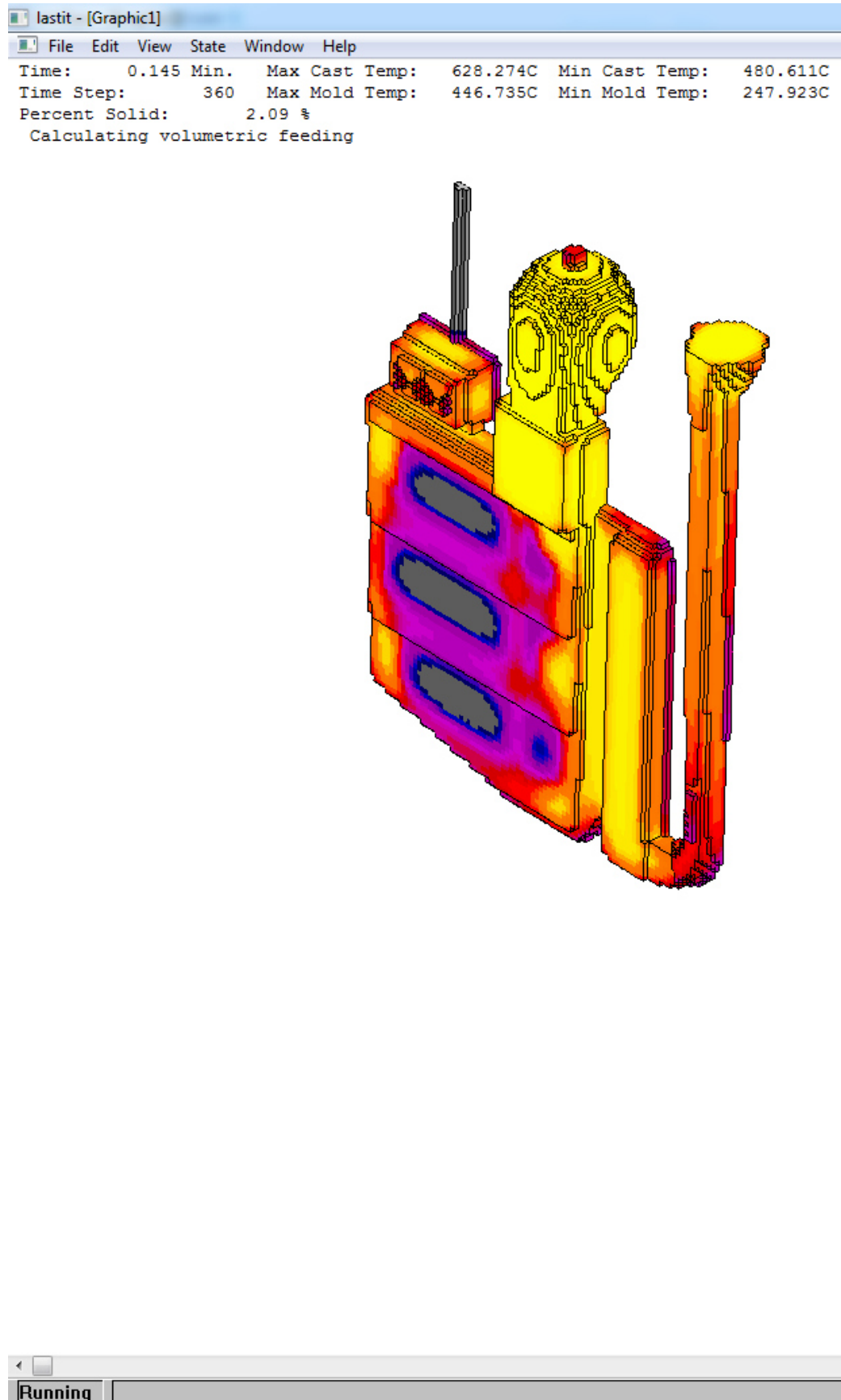
Simulation Name:

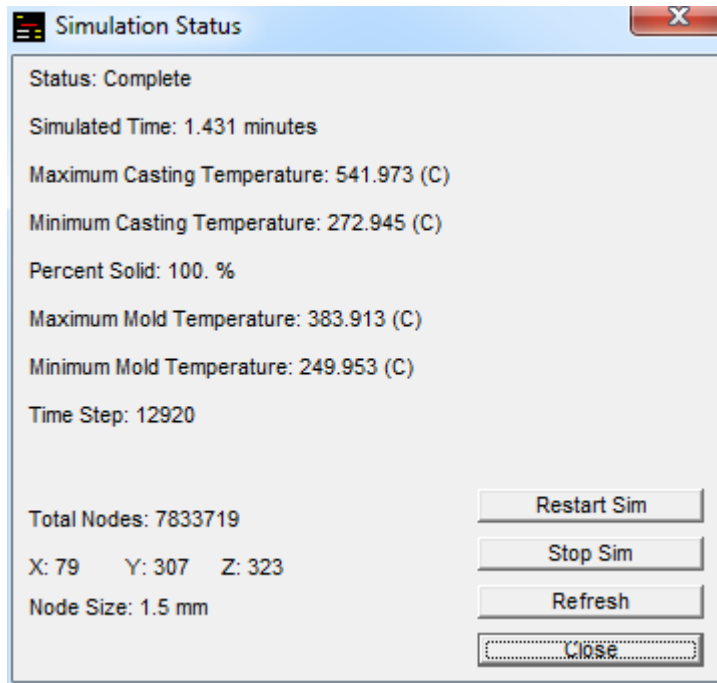
Simulation Type
☒ Single-Cycle
☐ Permanent Mold

Stop When:

☐ Run View Factor Before Simulating







Se simularon diversas propuestas hasta que se obtuvo un diseño y simulación optimizados que brindó los mejores resultados en cuanto a flujo de llenado y piezas sin defectos de calidad. A continuación, se enlistan las variables usadas en la simulación.

- Aleación: Aluminio 356.
- Material del molde: Hierro gris.
- Temperatura del metal líquido: 720°C.
- Temperatura del molde permanente: 250°C.
- Temperatura ambiente: 30°C.
- Tiempo de llenado: 9s.
- HTC entre casting – molde: 1000W/Km2
- HTC entre casting – ambiente: 10
- HTC entre casting –
- Tamaño del nodo 1.5mm

4.11. Modelo físico

Antes de realizar la simulación numérica, se elaboró un modelo en físico sin escala de la pieza de una propuesta preliminar para validar el diseño. Se usó unicel de dos pulgadas de espesor y con la ayuda de un esmeril pulidor de joyería como herramienta de desbaste, se plasmó el diseño, Figura 51. Posteriormente se cortó un vidrio del tamaño del modelo físico para cubrirlo y se aplicó un sellador por la periferia para evitar fugas de agua. Figura 52.

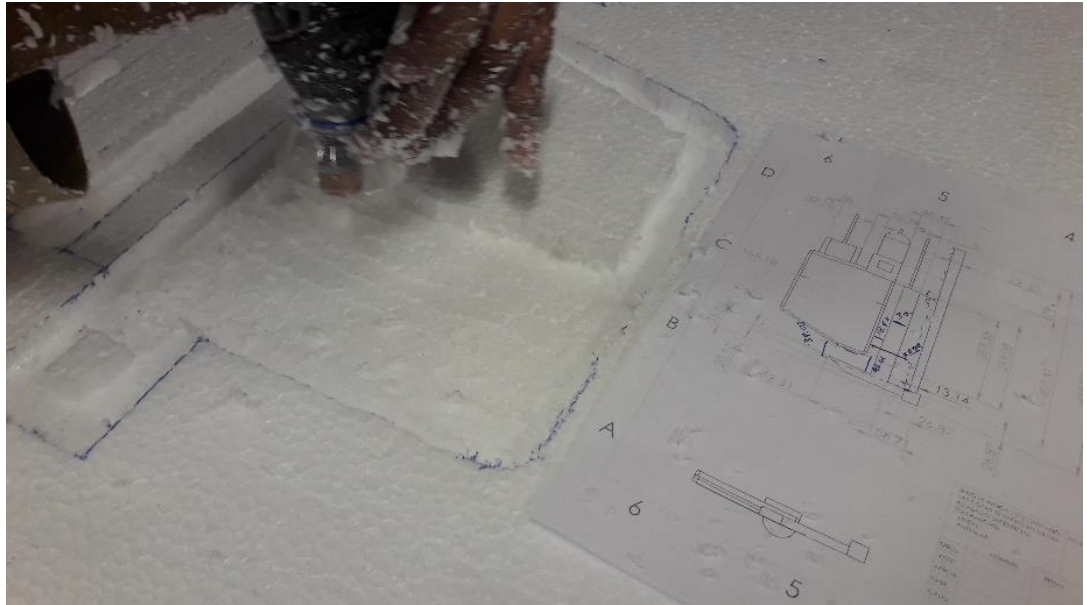


Figura 51. Elaboración de modelo físico

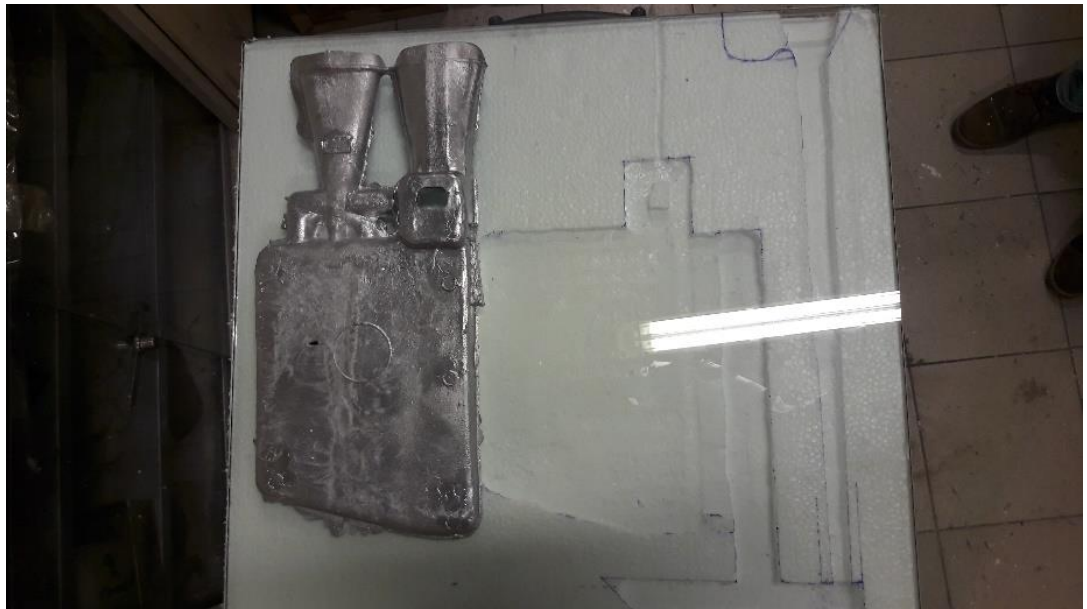
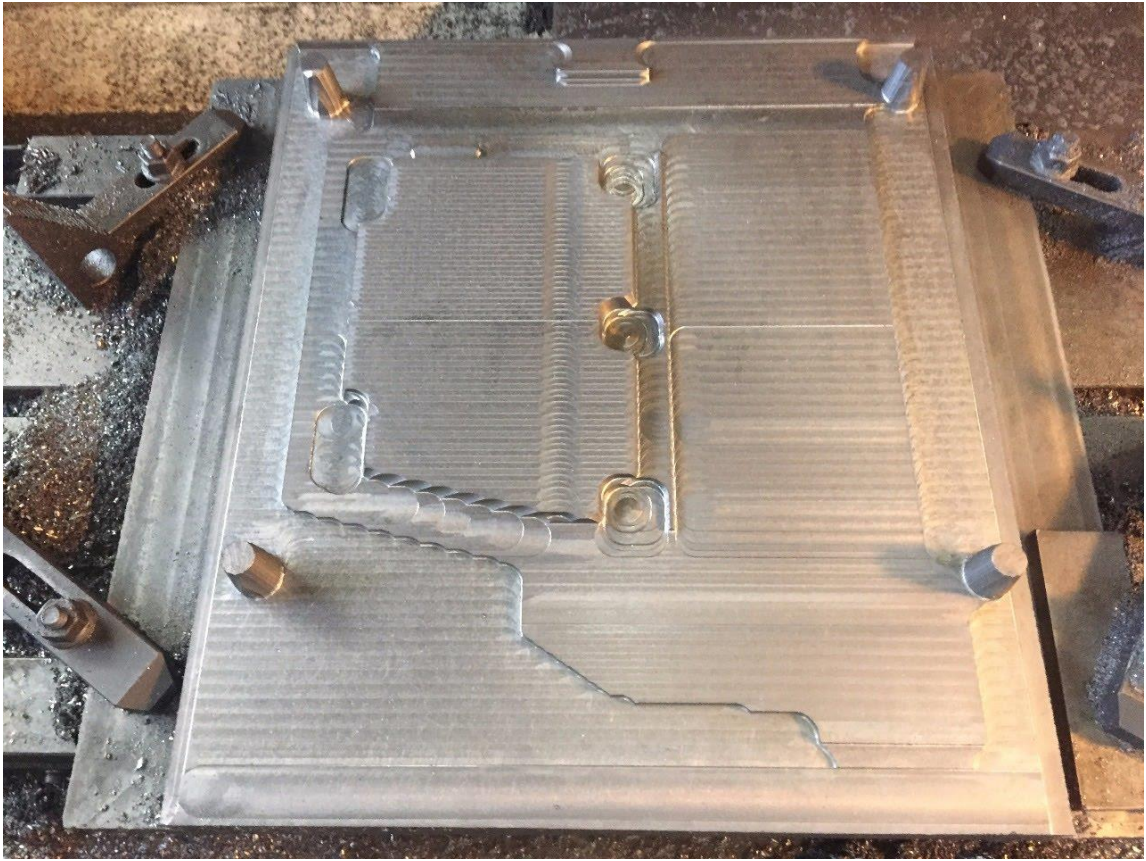
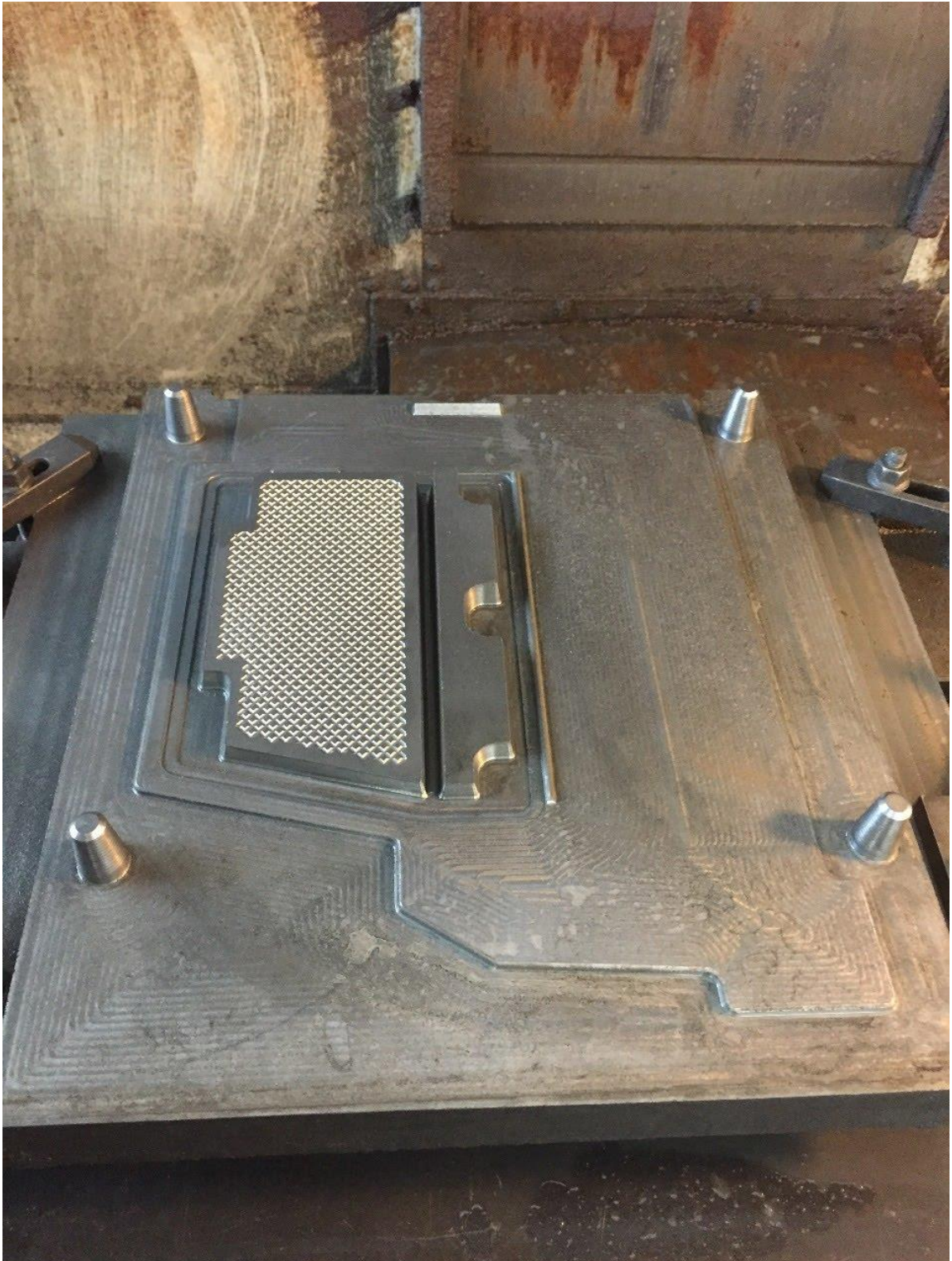


Figura 52. Modelo físico terminado

4.12. Manufactura de molde

Parte 1A





Parte 1B



4.13. Monitoreo del vaciado de piezas con molde actual y molde propuesto

El vaciado de la porta plancha 300 se realizaba mediante vaciado por gravedad en molde permanente de hierro gris, se realizó un seguimiento de la fabricación de la pieza con el molde actual y sin la intervención del tratamiento del metal líquido como se describió en los puntos 4.4 y 4.5, molde mostrado en la Figura 53, Así como un segundo seguimiento de la fabricación de la pieza, pero con el molde propuesto, Figura 54, con el respectivo cuidado y tratamiento del metal líquido. Para ambos casos se llevó la trazabilidad hasta el producto terminado logrando obtener información concisa de los defectos encontrados durante el proceso, de esta manera se correlacionó los defectos con los cambios hechos tanto en el proceso como en el diseño del sistema de alimentación.



Figura 53. Molde actual



Figura 54. Molde propuesto

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Identificación de los defectos

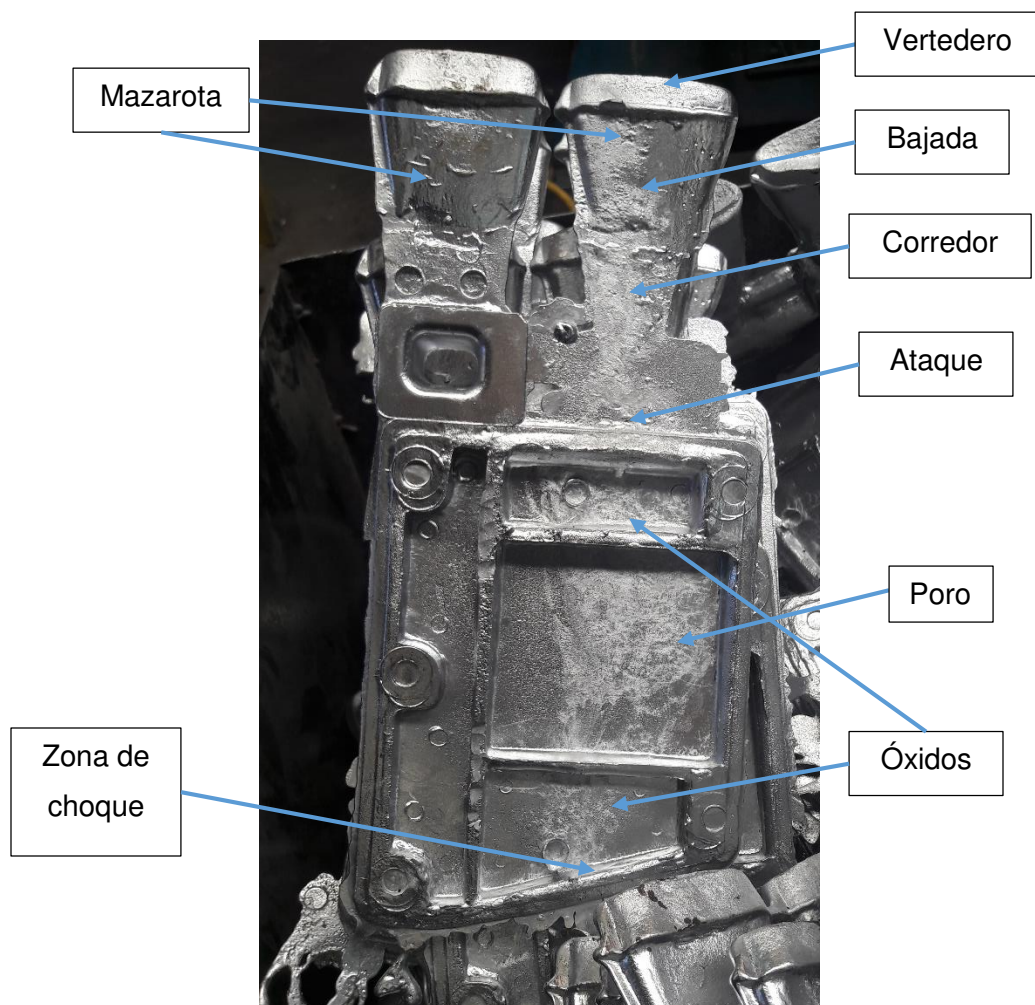


Figura 55. Pieza obtenida con molde actual dónde se aprecian defectos

La porta plancha tenía un sistema de alimentación pésimo como se muestra en la Figura 55, ya que carecía de colada, zona de choque, corredor, ataques y una mazarota no apta para la pieza. Contaba con una mazarota que al mismo tiempo se usaba como bajada, corredor, ataque y por ultimo fungía como mazarota, eso sin contar que el área de choque se encontraba en el inferior de la pieza generando óxidos (en color blanco) por flujo turbulento.

5.2. Análisis de composición química de la aleación

Los resultados obtenidos del espectrómetro de emisión atómica por arco eléctrico se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de los elementos presentes en la aleación

**Bruker Elemental
Analysis Report**



Sample:	C2M0H1 070518	Material:	AL 356	Method:	Al 120
Furnace No:		Heat No:		Order No:	
Analysis Time:	2018-05-07 08:18:34	User:		Unit:	%
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Ø	6.668	0.224	0.062	0.061	0.359
	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag
Ø	0.018	0.0064	0.035	0.100	0.0002
	Be	Bi	Ca	Cd	Co
Ø	0.00004	<0.0010	0.0003	0.0004	<0.0002
	Ga	Mo	Na	Pb	Sn
Ø	0.012	0.0004	<0.00010	0.0038	0.0007
	Sr	V	Zr	Hg	Al
Ø	0.0056	0.0094	0.0025	0.0010	92.44

Se observan varios elementos presentes en la aleación, unos como aleantes y otros como contaminantes. En la Tabla 4 se muestran los rangos de cada uno de los elementos aleantes permitidos en la A356.

Tabla 4. Composición química de aluminio A356

COMPOSICIÓN QUÍMICA

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	Otros elementos		%Al
							Cada uno	Total	
6.5-7.5	0.13-0.6	0.1-0.25	0.05-0.35	0.2 - 0.45	0.35	0.25	0.05	0.15	Balance

Analizando detalladamente se considera que la aleación utilizada cumple con la especificación de la A356 y por lo tanto puede ser utilizada para la industria alimenticia de acuerdo al estándar ANSI/NSF 51-1997 Materiales de equipos para comida [1].

5.3. Análisis de desgasificado

El proceso de desgasificado tiene efectos muy favorables sobre la disminución del contenido de hidrógeno disuelto en el metal líquido y el nivel de inclusiones no metálicas.

Se conoce que cuando el H_2 se disuelve en el aluminio fundido, el hidrógeno se disocia en hidrógeno atómico, es muy reactivo y rápidamente absorbido por el aluminio fundido. La forma más eficiente de realizar el desgasado del aluminio es hacer burbujear un gas inerte en el seno del metal líquido. Durante el tiempo que las burbujas permanecen en el líquido y ascienden hasta la superficie, el H difunde hacia las burbujas debido a la diferencia de presiones parciales entre el aluminio y la burbuja de gas.

Para el primer método de desgasificado con lanza fija, la lanza no se mueve durante el proceso, permanece estática con cierta inclinación por cuestiones de diseño y sujeción de la misma dentro del crisol, esto provoca burbujas de gran tamaño en una zona determinada, mientras que las zonas más alejadas de la lanza carecen de un pobre contacto con las burbujas de nitrógeno.

La Figura 56 muestra el comportamiento de las burbujas en una prueba con agua realizada en agua a escala [8]. En ella se observó que las burbujas generadas por la lanza de inyección son de tamaño relativamente grande y que al llegar a la superficie libre del líquido la perturban formando turbulencia significativa. Si trasladamos ese comportamiento a un crisol de con 600kg de aluminio líquido, se esperaría que en la superficie se genere una capa de óxido que lo protege del contacto con el medio ambiente. Las burbujas con poca dispersión y de gran tamaño causadas por la inyección de nitrógeno perturban dicha capa de óxido aislante y favorecen el contacto del metal con la humedad del ambiente. Con este método la hipótesis teórica que explicaría el incremento de la contaminación por hidrógeno al incrementar el tiempo de desgasificación, es que durante los primeros segundos de inyección si bien el nitrógeno es capaz de eliminar al hidrógeno del metal líquido, sin embargo, la capa de óxido superficial es dañada por el constante burbujeo del nitrógeno en la superficie libre. Después de algunos segundos la capa de óxido se daña al grado que un

mayor volumen del metal líquido que está por debajo de ella queda expuesto al medio ambiente, absorbiendo más hidrógeno que el nitrógeno es capaz de eliminar. A partir de este punto la cantidad de hidrógeno que entra al metal por la ruptura de la capa de óxido es mayor que la que el nitrógeno es capaz de eliminar, incrementándose la concentración de hidrógeno en el metal, generando porosidad aparente y reduciendo el valor de su densidad a presión reducida. Si la lanza se cambiara de lugar o se agitara con la finalidad de favorecer que mayor volumen de aluminio estuviera en contacto con las burbujas, esta agitación leve no controlada se suma a la turbulencia causada por las burbujas deteriorando aún más la capa de óxido superficial y favoreciendo la contaminación del metal. Es por esto que se llevó a cabo la desgasificación con el método rotativo dónde se tiene más control de las condiciones.



Figura 56. Pobre distribución de burbujas con lanza

Para el segundo método de desgasificado, con rotor, se usó un equipo semi automático que controla las revoluciones a las que gira el rotor, así como regula el flujo de gas nitrógeno que circula por el interior. Esto permite tener una distribución homogénea de las burbujas. Aunado a esto, el diseño cuadrangular del rotor tiene el propósito de romper la burbuja convirtiéndola en burbujas más pequeñas. Con esto se logra burbujas de tamaño pequeño abarcando todo el volumen del crisol.



Figura 57. Excelente distribución de burbujas con rotor

La Figura 57 muestra el comportamiento de las burbujas en una prueba con agua realizada en agua a escala [9]. Un sistema de desgasificado del aluminio líquido mediante la inyección de un gas nitrógeno a través de un inyector rotativo produce una fina nube de burbujas.

Para obtener el mayor rendimiento del desgasificado el metal líquido tendría que ser bien agitado de modo que la concentración de hidrógeno sea esencialmente uniforme a través de todo el fundido.

Se hizo evidente que la desgasificación rotativa no sólo produce burbujas "finas y pequeñas" sino que lo más importante es que las burbujas se dispersan uniformemente a través de la masa fundida.

Para validar la eficiencia del desgasificado, en el punto 5.4 se discuten los resultados que ofrece la prueba de presión reducida.

5.4. Análisis de prueba de presión reducida

Se estableció un estándar comparativo para aceptar o rechazar la probeta de presión reducida y poder comparar los métodos de desgasificado con lanza y con rotor. En la Figura 58, se muestra el estándar utilizado [10]. Cabe destacar que es un método cualitativo ya que es una comparación y depende del evaluador.

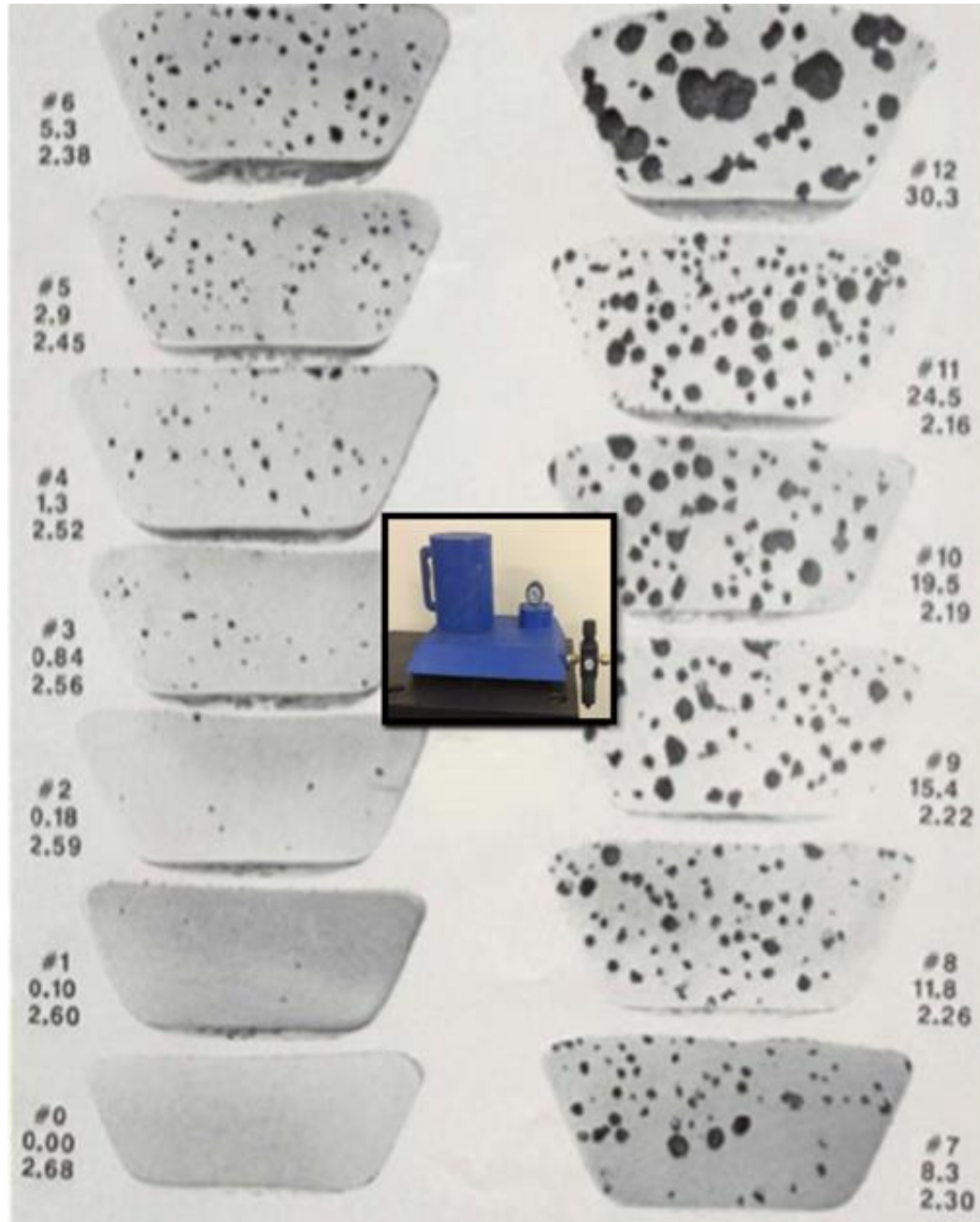


Figura 58. Guía de comparación para evaluar las probetas seccionadas

El estándar se interpreta de la siguiente manera, el primer renglón de cada ilustración corresponde a la numeración del #1 al #12, el segundo renglón a la concentración de hidrogeno por cada 100gr de aleación y el tercer y último renglón corresponde a la densidad de la aleación expresada en g/cm^3 .

Por ejemplo, para el caso de un buen desgasificado (ilustración #1 del estándar) tenemos 0.00 de concentración de hidrogeno por cada 100g de la aleación y la densidad de la aleación es de 2.68g/cm^3 en otras palabras, una aleación libre de hidrogeno. Para el caso de un mal desgasificado (ilustración #12 del estándar) tenemos 30.3 de concentración por cada 100g de la aleación y la densidad de la aleación es menor que $2.16/\text{cm}^3$ lo cual significa una aleación totalmente contaminada por hidrogeno durante la solidificación.

Se hicieron 4 pruebas en distintos días para corroborar repetitividad de la prueba. A continuación las Figura 59, Figura 60, Figura 61 y Figura 62 muestran las probetas de presión reducida obtenidas como lo establece el punto 4.5, correspondiendo los incisos A) a una probeta desgasificada mediante el método por lanza fija, mientras que los incisos B) hacen referencia a una probeta desgasificada mediante el método de lanza rotativa.

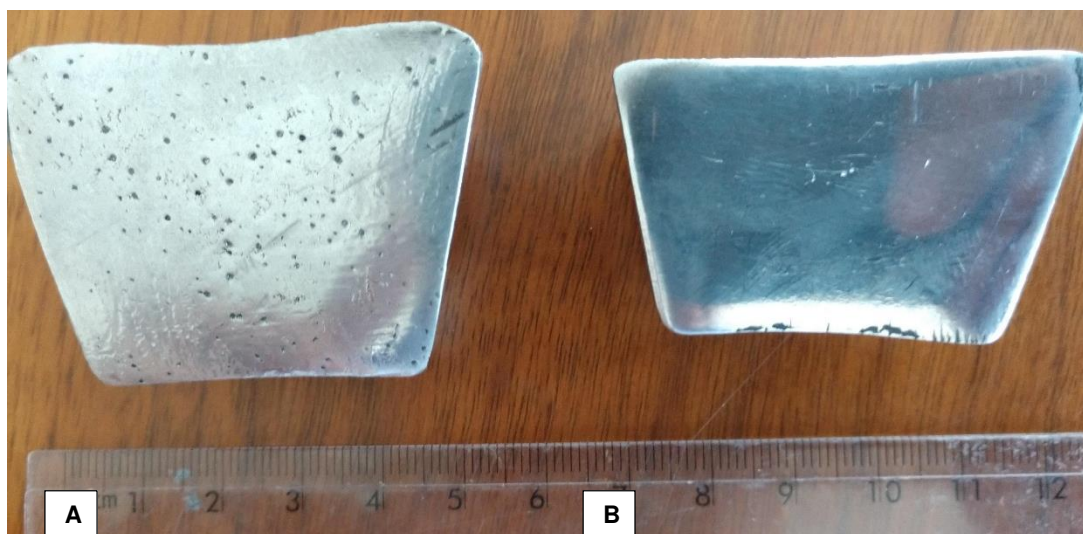


Figura 59. Prueba 1, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor

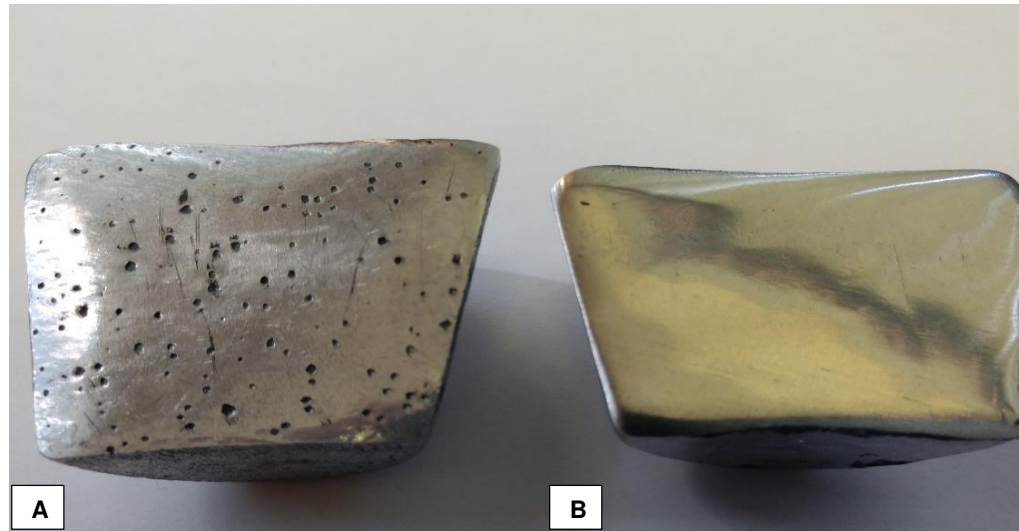


Figura 60. Prueba 2, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor

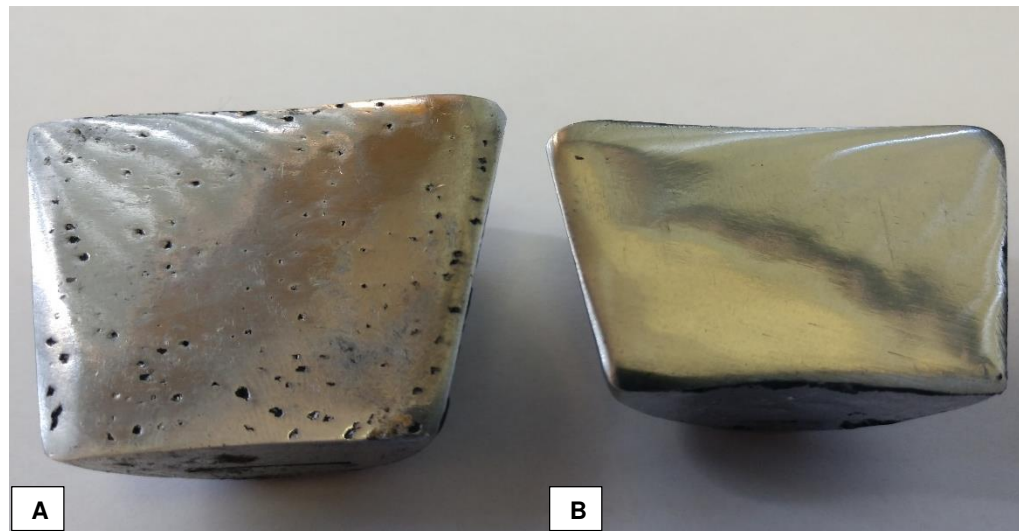


Figura 61. Prueba 3, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor

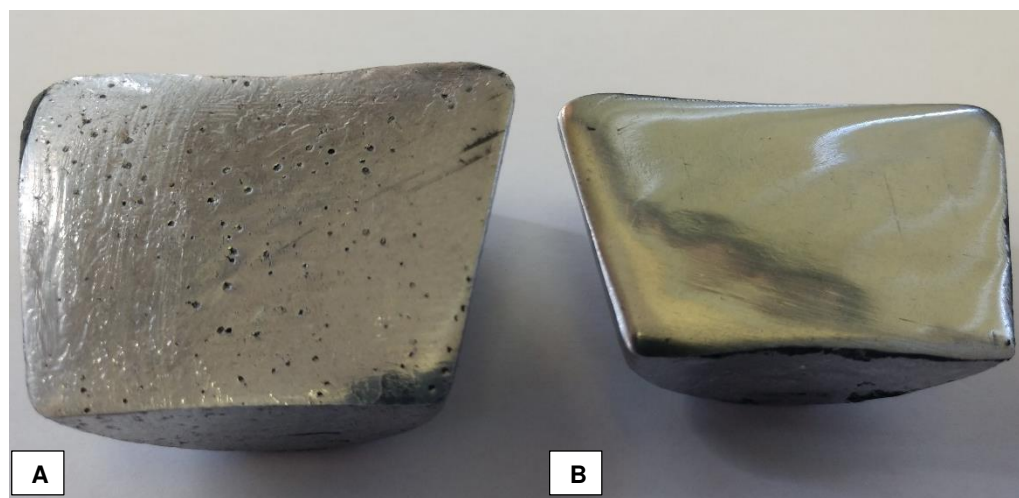


Figura 62 . Prueba 4, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor

A continuación, la Tabla 5, ofrece los datos de manera comparativa para apreciar los resultados obtenidos mediante la comparación de cada probeta contra el estándar presentado el inicio de este punto.

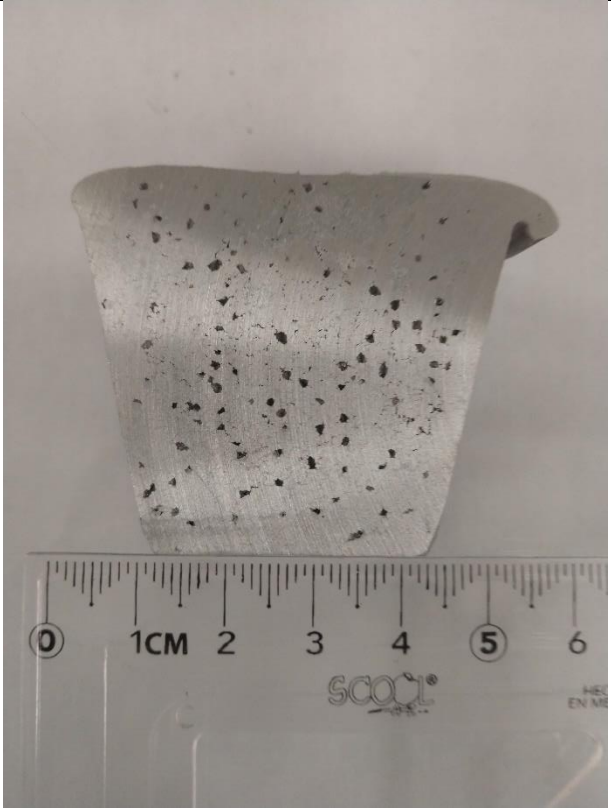
Tabla 5 Resultados de las pruebas de presión reducida de acuerdo a la comparación con el estándar

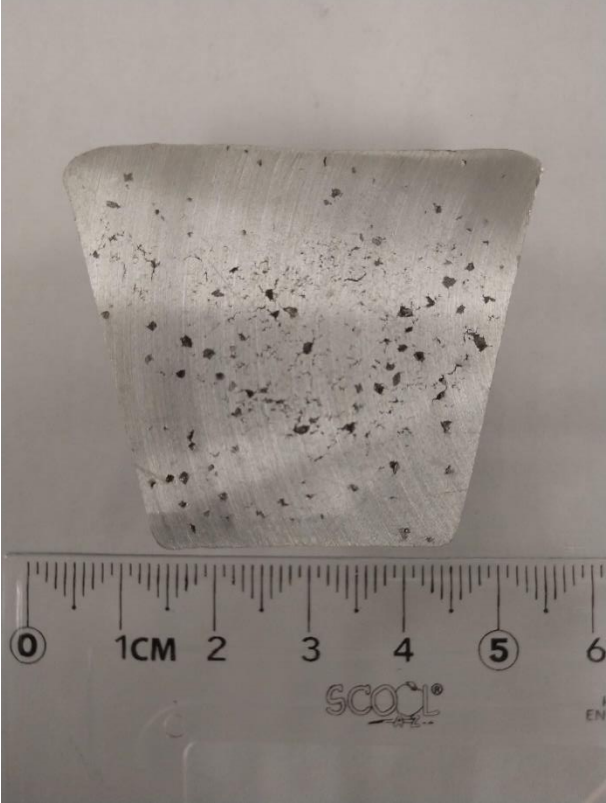

		<i>PROBETA A</i> <i>Lanza fija</i>	<i>PROBETA B</i> <i>Lanza rotativa</i>
<i>Prueba 1</i>	Ilustración	# 4	# 1
	Concentración	1.3	0.00
	Densidad	2.52	2.68
<i>Prueba 2</i>	Ilustración	# 6	# 1
	Concentración	5.3	0.00
	Densidad	2.38	2.68
<i>Prueba 3</i>	Ilustración	# 5	# 1
	Concentración	2.9	0.00
	Densidad	2.45	2.68
<i>Prueba 4</i>	Ilustración	# 4	# 1
	Concentración	1.3	0.00
	Densidad	2.52	2.68

Los resultados son bastante evidentes, Si analizamos los resultados de las probetas contra el estándar podemos deducir que, en general las probetas A para el caso de lanza fija se aprecia una superficie llena de poros por hidrogeno mientras que las probetas B para el caso del uso de rotor se aprecia una superficie libre de poros. Esto es una garantía de que el tratamiento del metal líquido y desgasificado se ha llevado de manera exitosa.

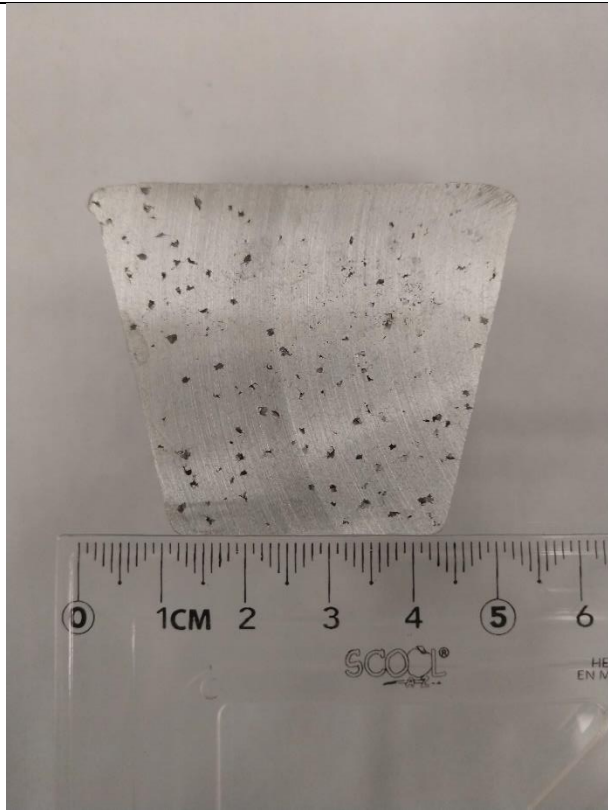
En el punto 5.5 se analizaran los resultados de manera cuantitativa ya que este punto solo ofrece un estudio cualitativo, sin embargo, es una herramienta para el departamento de calidad de la empresa. Se estableció aceptar probetas semejantes a la #1 y #2 por cuestiones de calidad para productos de grado alimenticio, y diferentes a estos será necesario desgasificar nuevamente.

5.5. Análisis contenido de hidrogeno

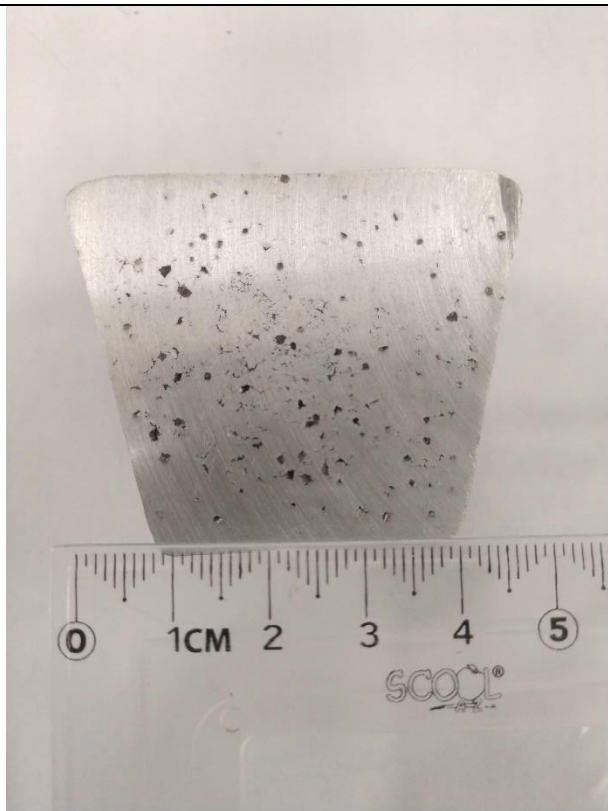
Probeta	Contenido	Imagen
1		

2		
3		

4



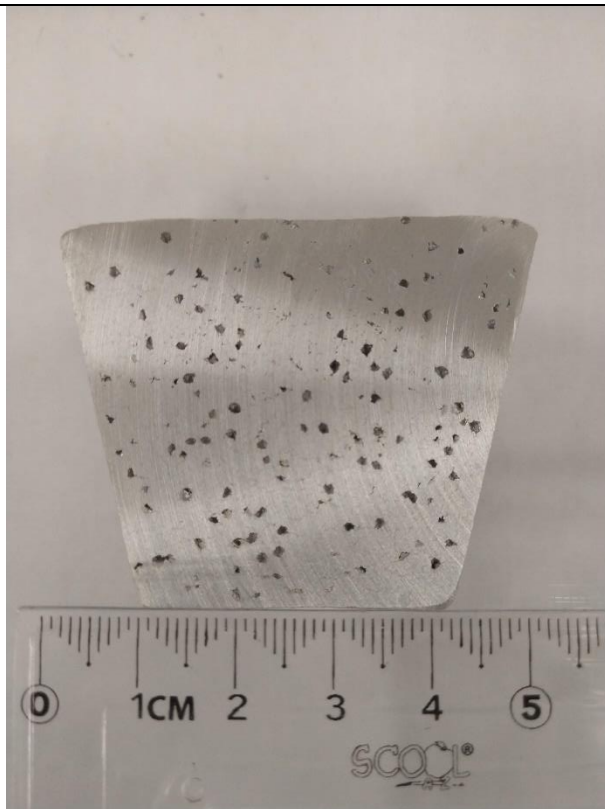
5

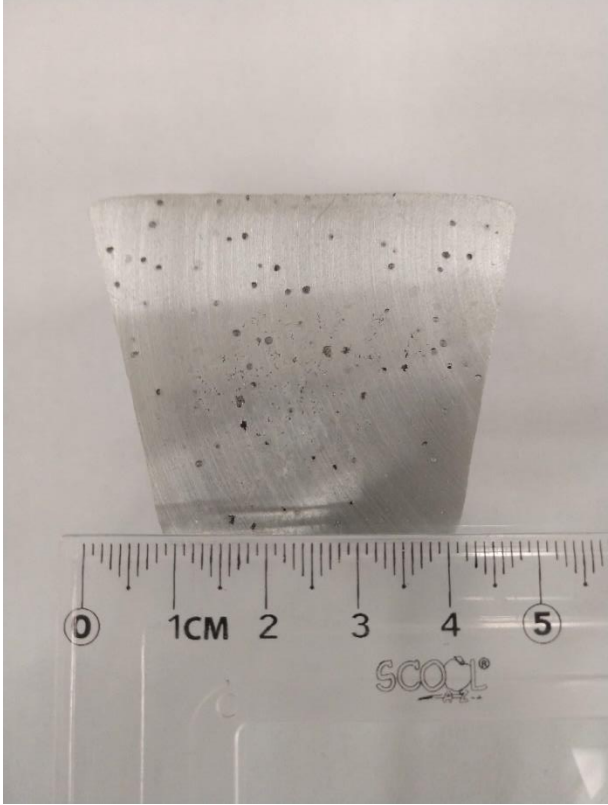
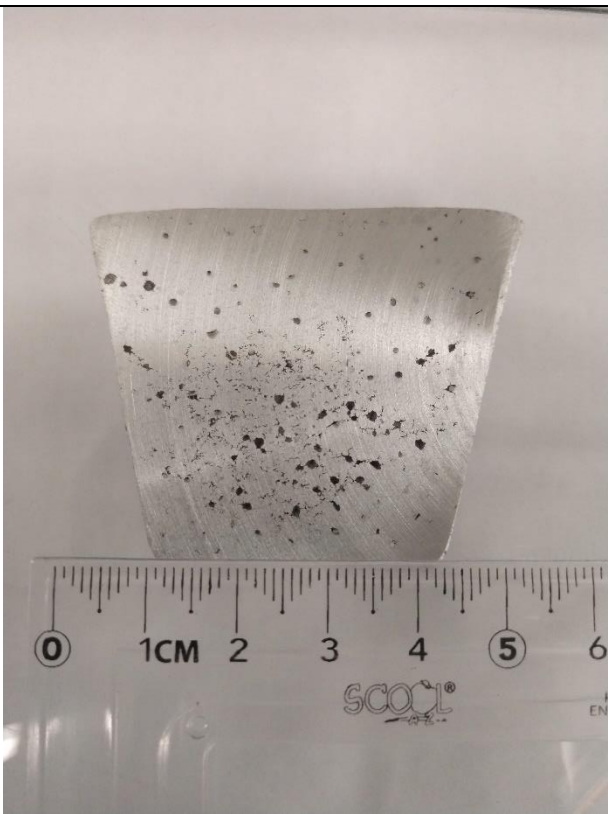


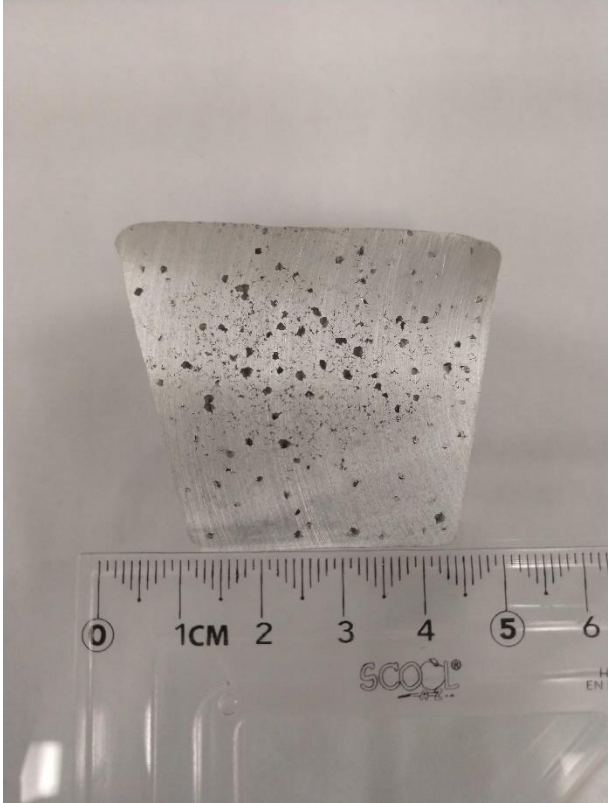
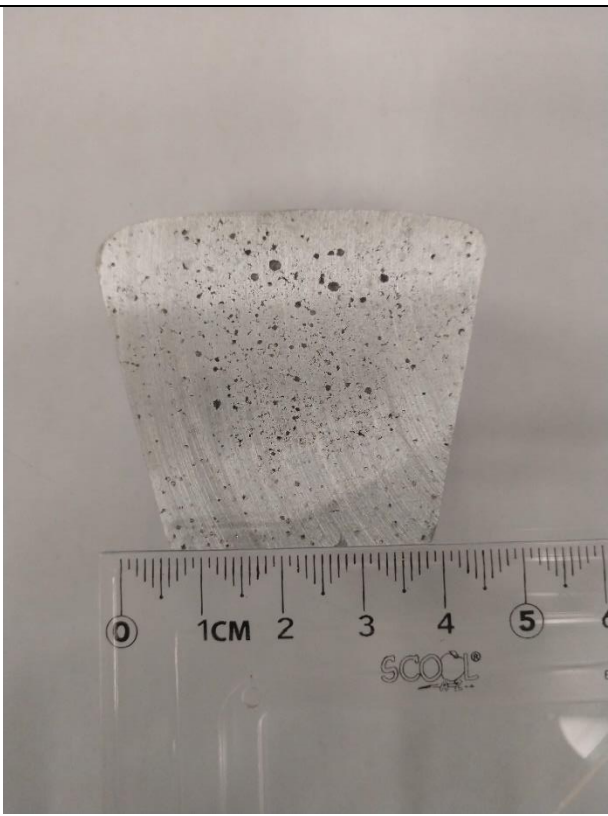
6



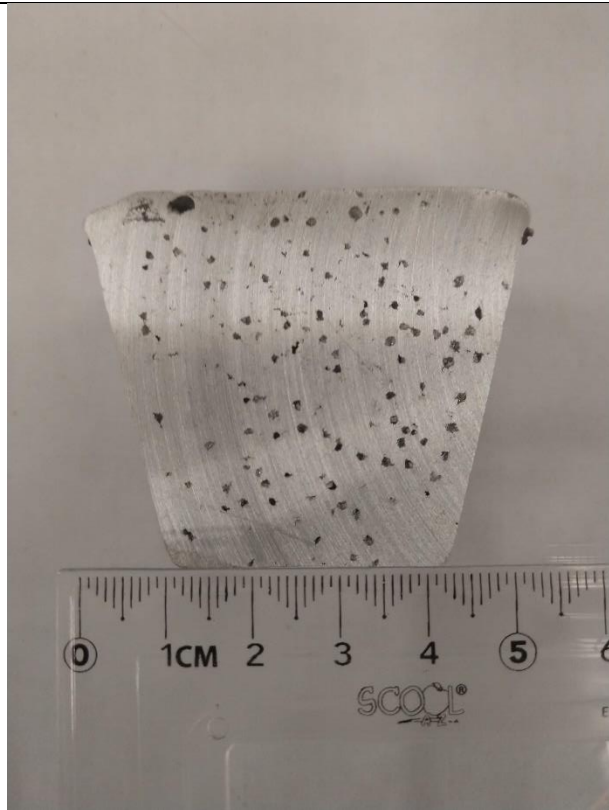
7



8		
9		

10		
11		

12



5.6. Análisis de porosidad

5.6.1. Micro porosidad vista en microscopio óptico y electrónico de barrido

Se realizaron cortes en la pieza de estudio y a través de las diferentes técnicas de caracterización se logró encontrar el tipo de defecto de mayor presencia en el producto. Se analizaron a través de las técnicas de Microscopía Óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

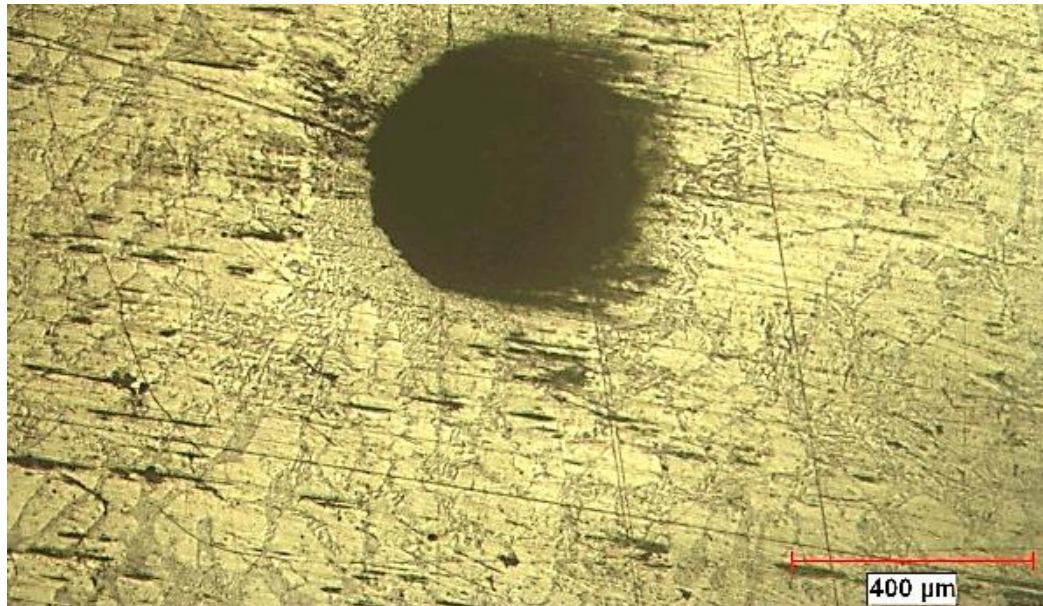


Figura 63. Metalografía mostrando micro porosidad por gas a 40X en microscopio óptico

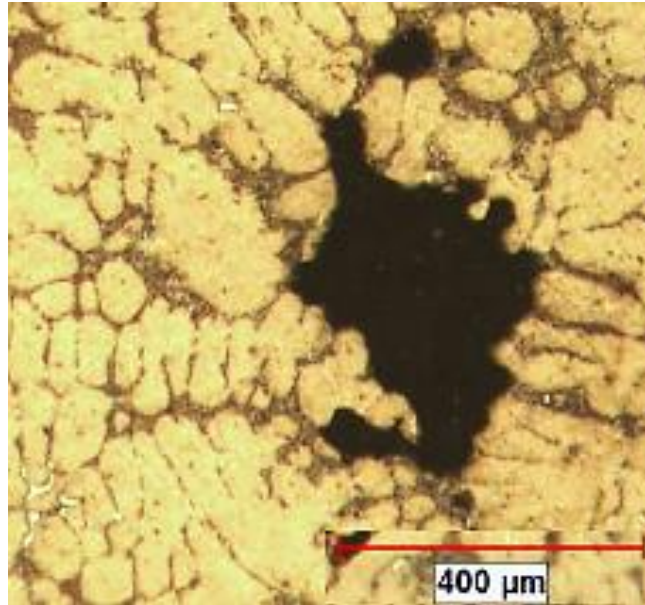


Figura 64. Metalografía mostrando micro contracción a 40X en microscopio óptico

En las anteriores figuras podemos apreciar que los principales defectos encontrados son porosidad por gas atrapado en la pieza, Figura 63, y micro-contracciones, este defecto se caracterizan por tener una morfología que adopta la forma de los brazos detríticos región que es la última en solidificar, la evidencia más clara se denota en la Figura 64. Cabe resaltar que este tipo de defectos se observaron de manera interna y superficial, el tamaño es considerable del orden de 400μm y en algunos casos se podían observar sin microscopio.

Dando seguimiento a la caracterización de los defectos, se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) donde podemos observar nuevamente el tipo de defectos que es característico de una micro contracción. Figura 65

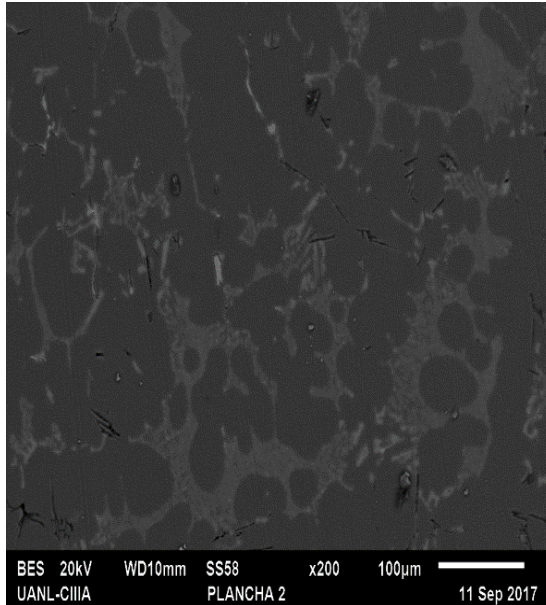


Figura 65. Defectos a 200X en microscopio electrónico de barrido

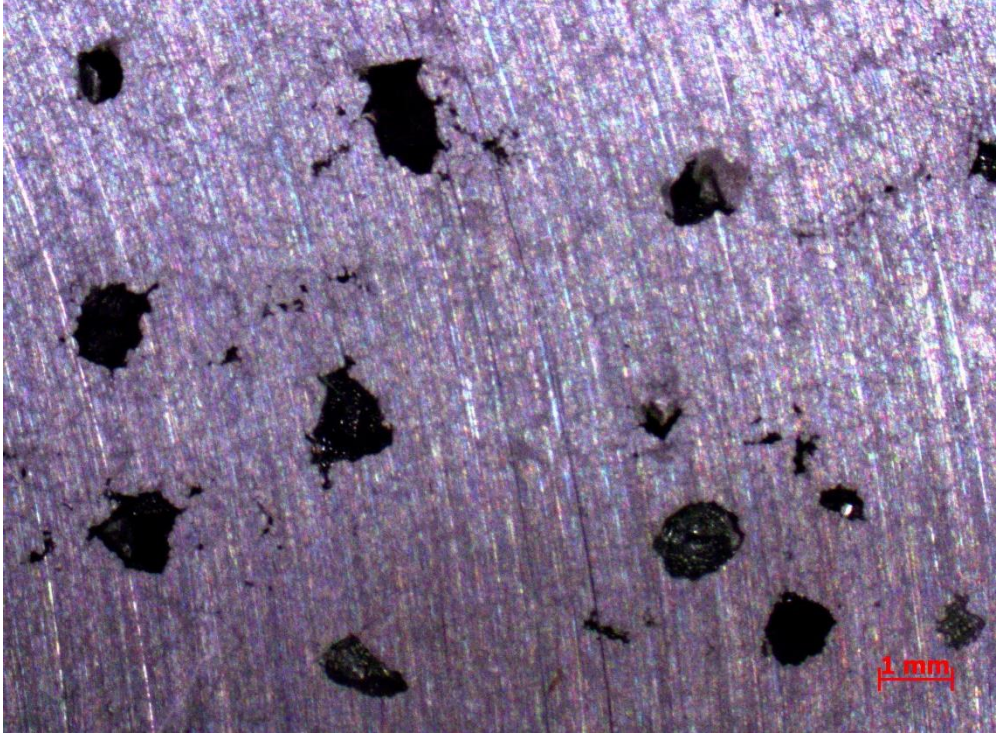
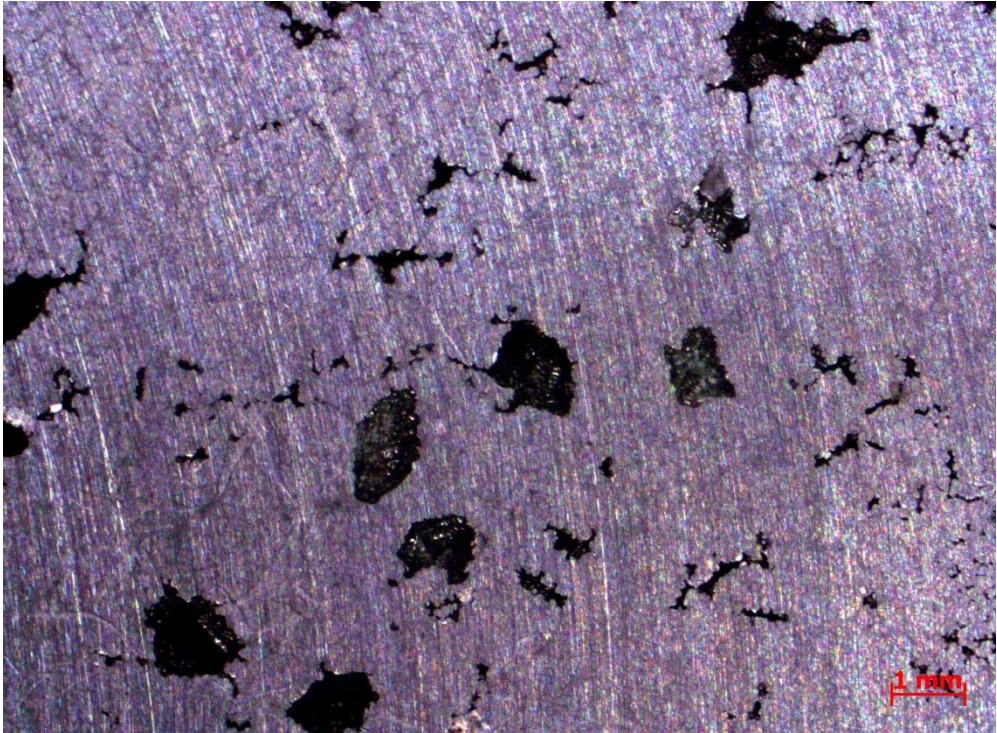
Dado que la porosidad por vapor es un defecto que usualmente aparece como agujeros redondos justo debajo de la superficie del casting y sale a la luz durante el maquinado, estos defectos son visibles desde que se desmolda la pieza así que no puede atribuir esta causa.

Los agujeros de sopladura o blow holes en inglés, son agujeros redondos causados por la generación o acumulación de aire o gas atrapado. La causa usual está muy ligada con la permeabilidad de la arena debido a una pobre distribución de los granos de arena y o contaminación. Para el caso de molde permanente no aplica. También pueden ser originados por un llenado turbulento del molde, dado que el sistema de alimentación que presentaba el molde inicial carecía de todo tipo de relación matemática para un comportamiento de flujo laminar, parte de la porosidad encontrada se le puede atribuir a esta causa.

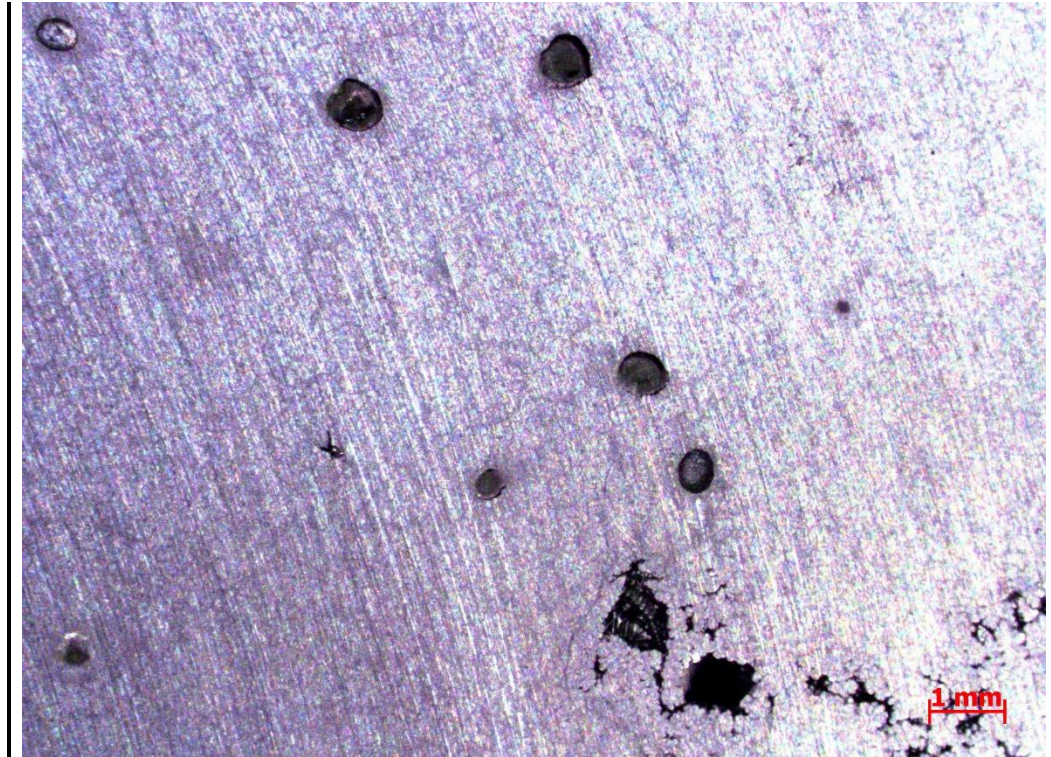
La porosidad por gas se manifiesta como orificios redondos ampliamente dispersos que aparecen en superficies fracturadas y mecanizadas. Este defecto es causado por la absorción de gases en el metal durante la fusión. Este gas se libera durante la solidificación, la causa es por una pobre práctica de fusión (condiciones de oxidación) y una pobre práctica de desoxidación. Es necesario tener un mayor control en el desgasificado del metal fundido, así como su manipulación hasta que es vertido en el molde y condiciones de solidificación.

5.6.2. Macro porosidad vista en estereoscopio

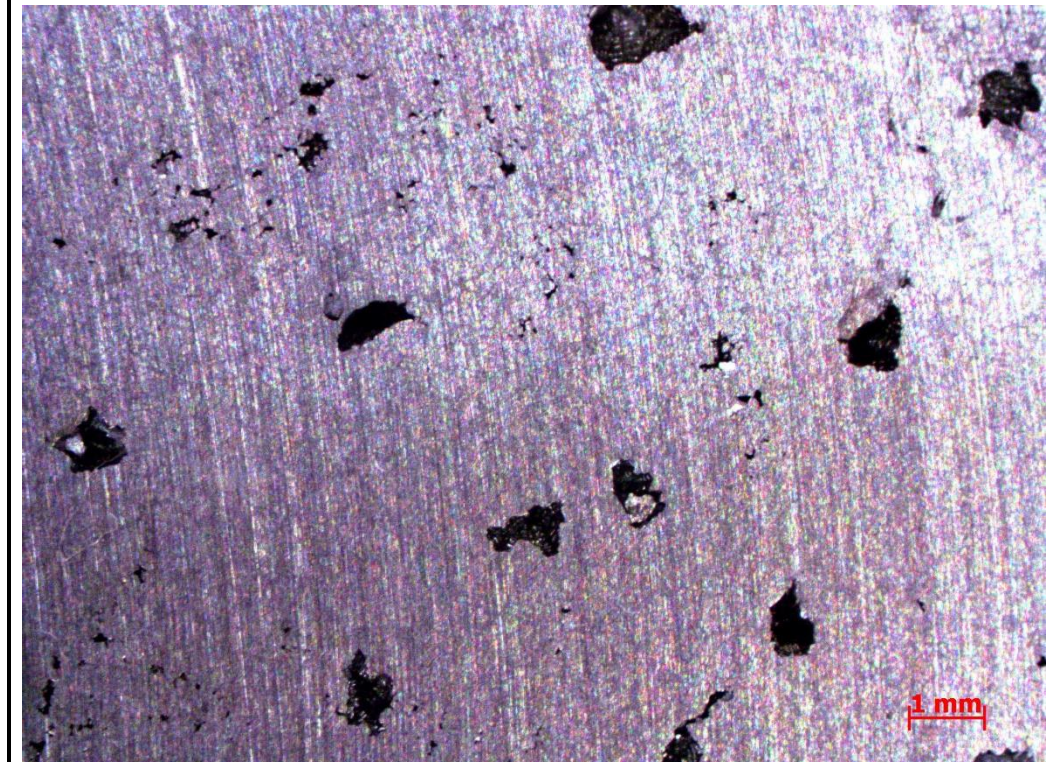
Tabla 6. Macro porosidad en las probetas de estudio

Probeta	Imagen
1	 Micrograph of specimen 1 showing macro porosity. The image displays a light-colored, textured surface with numerous dark, irregularly shaped pores of varying sizes. A red scale bar in the bottom right corner indicates 1 mm.
2	 Micrograph of specimen 2 showing macro porosity. The image displays a light-colored, textured surface with numerous dark, irregularly shaped pores of varying sizes. A red scale bar in the bottom right corner indicates 1 mm.

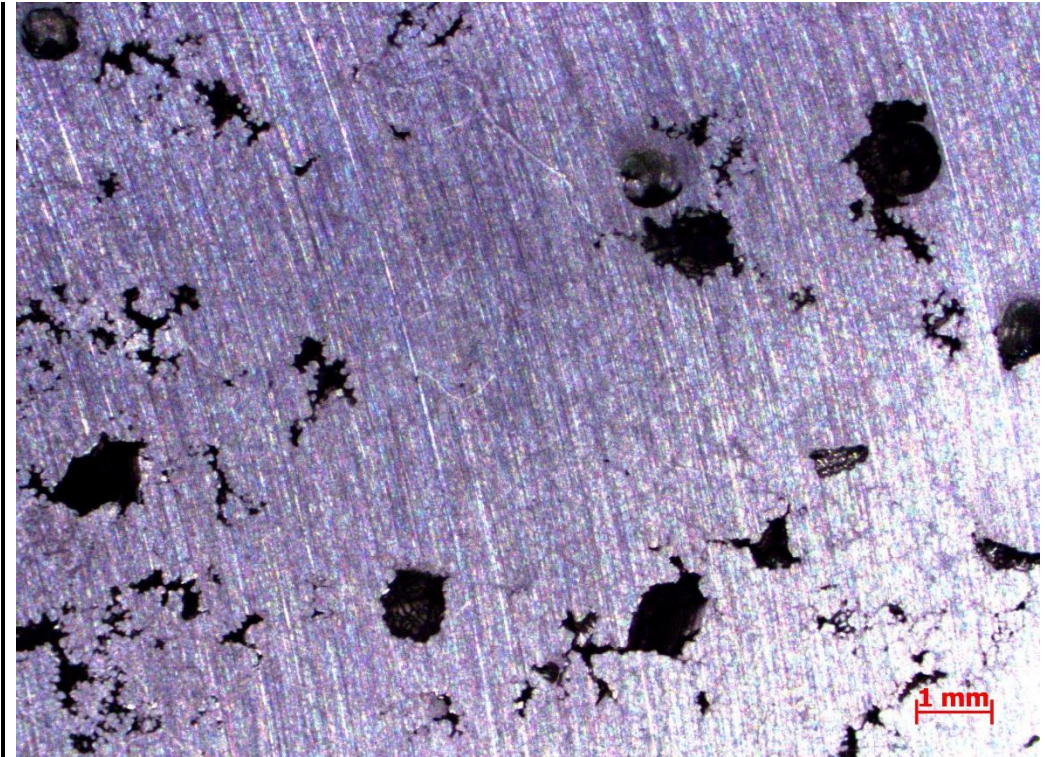
3



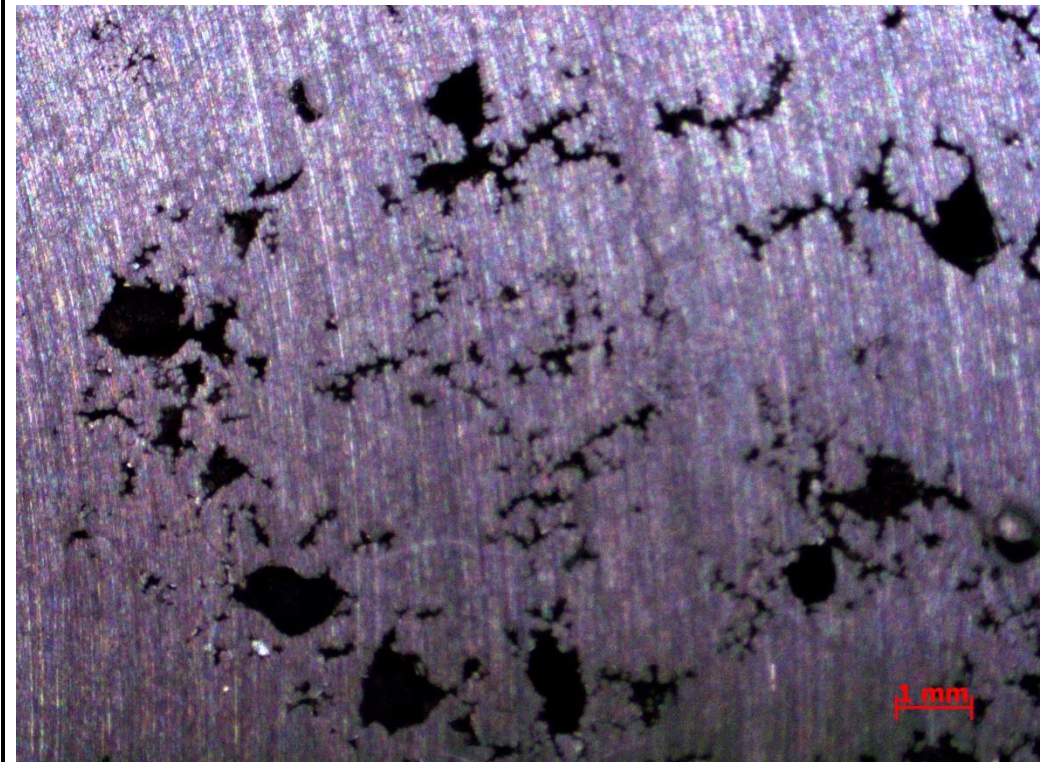
4



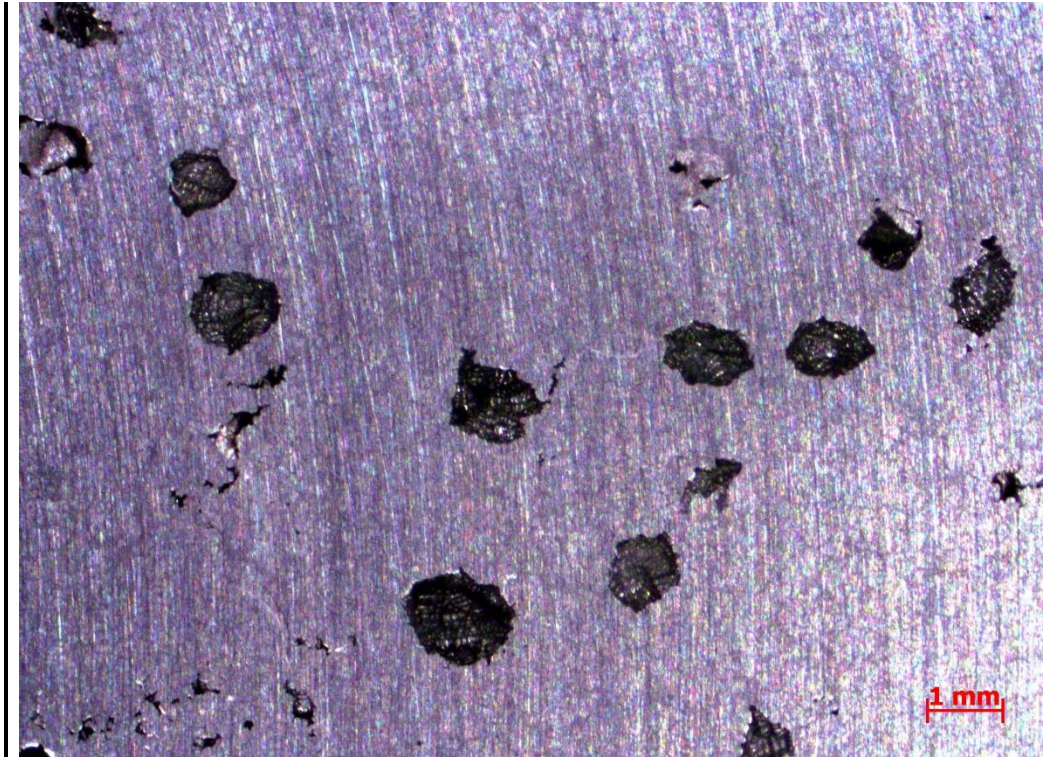
5



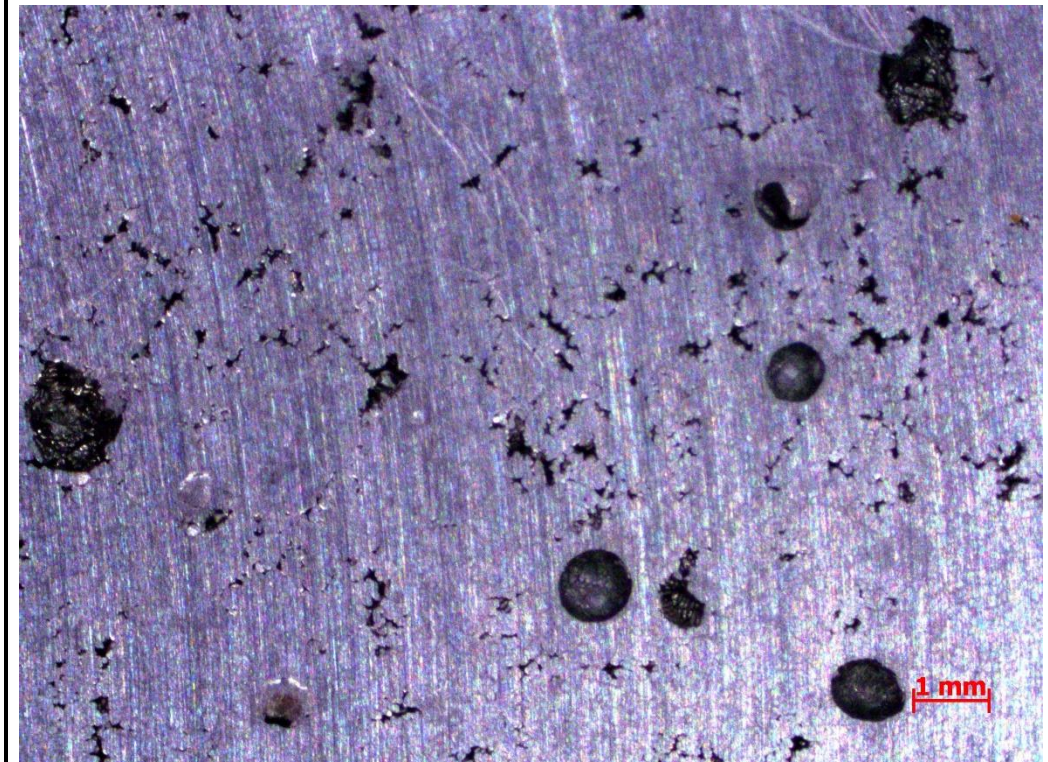
6



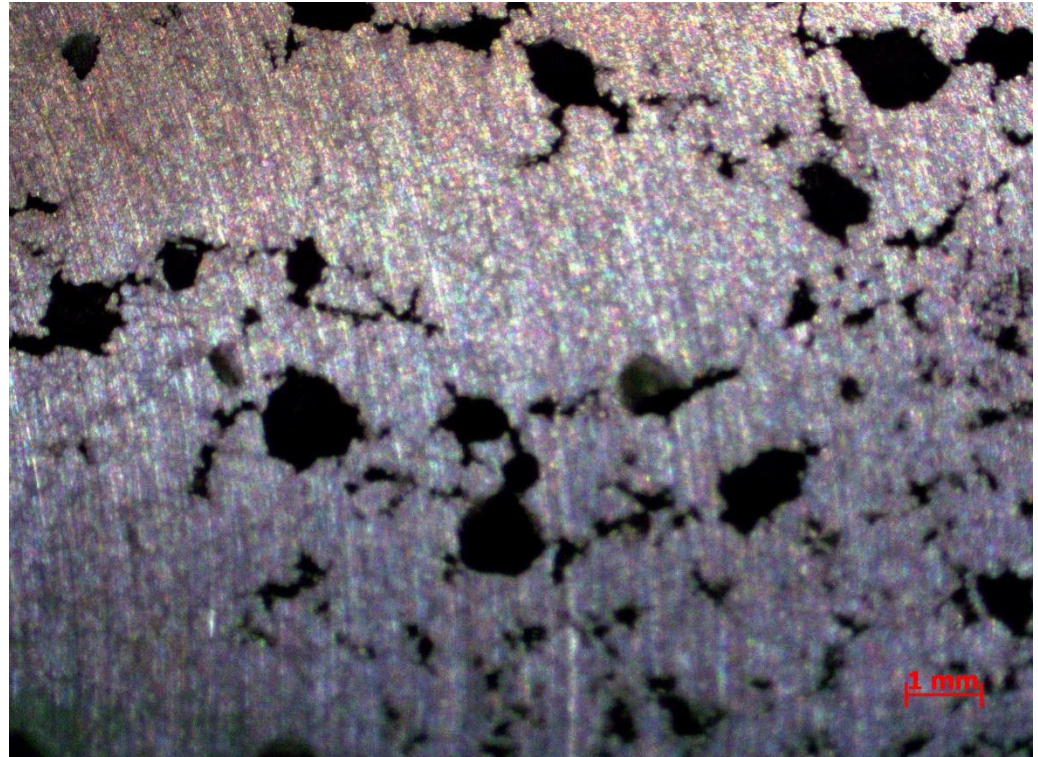
7



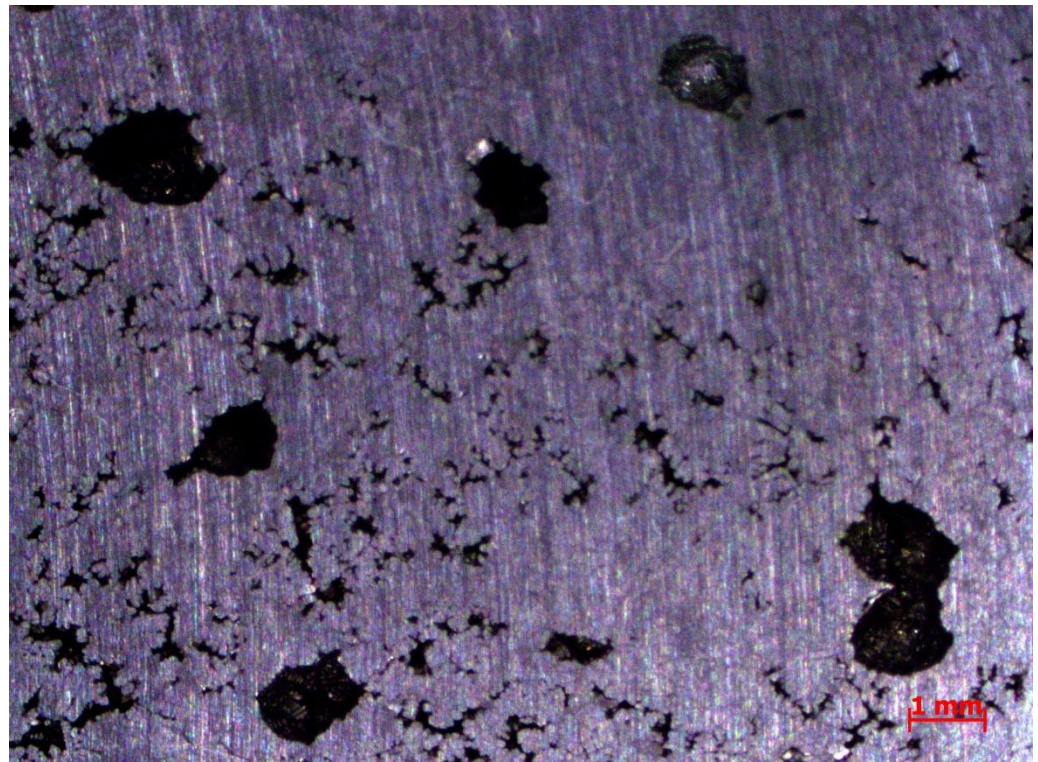
8



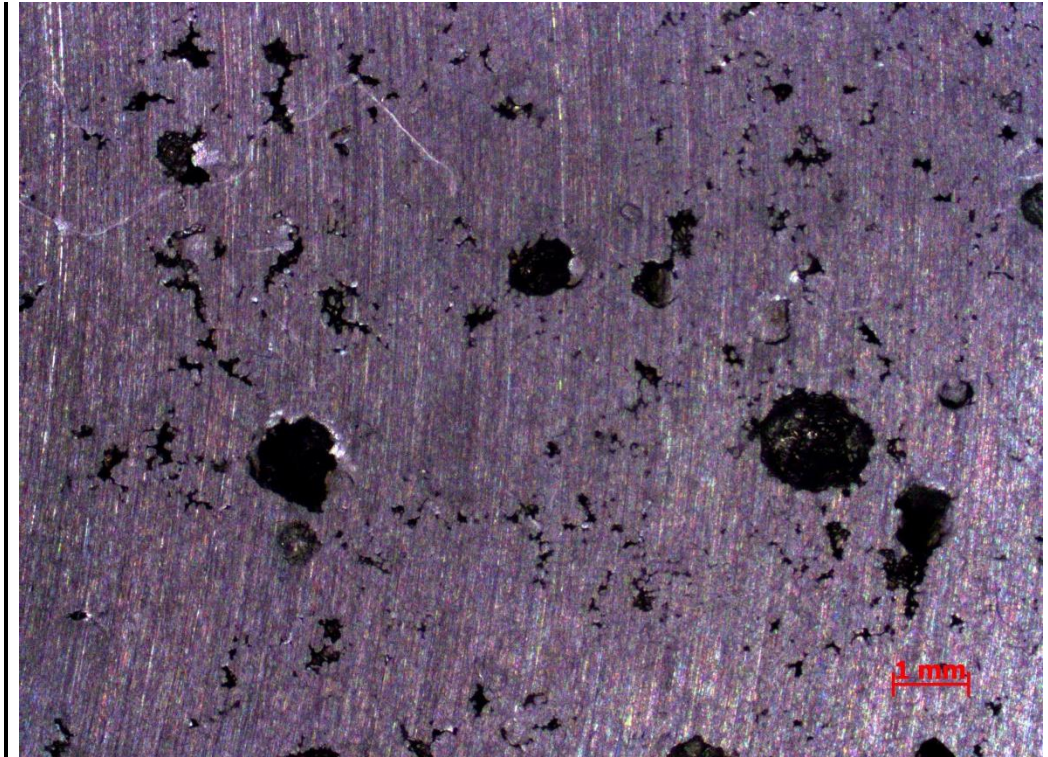
9



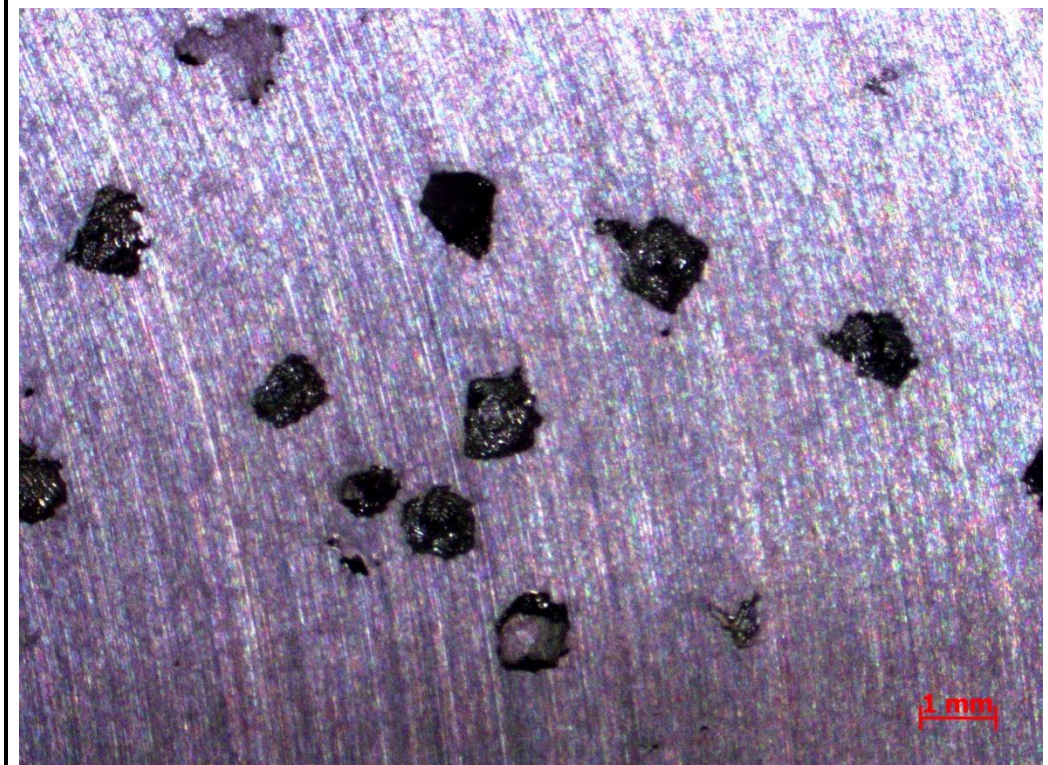
10



11

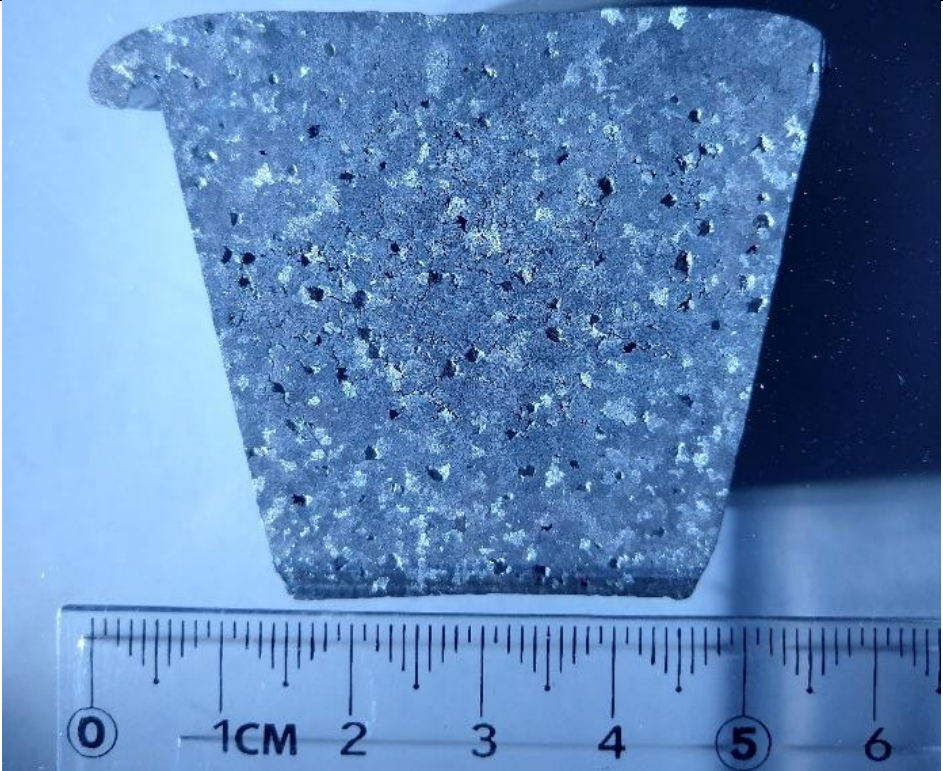
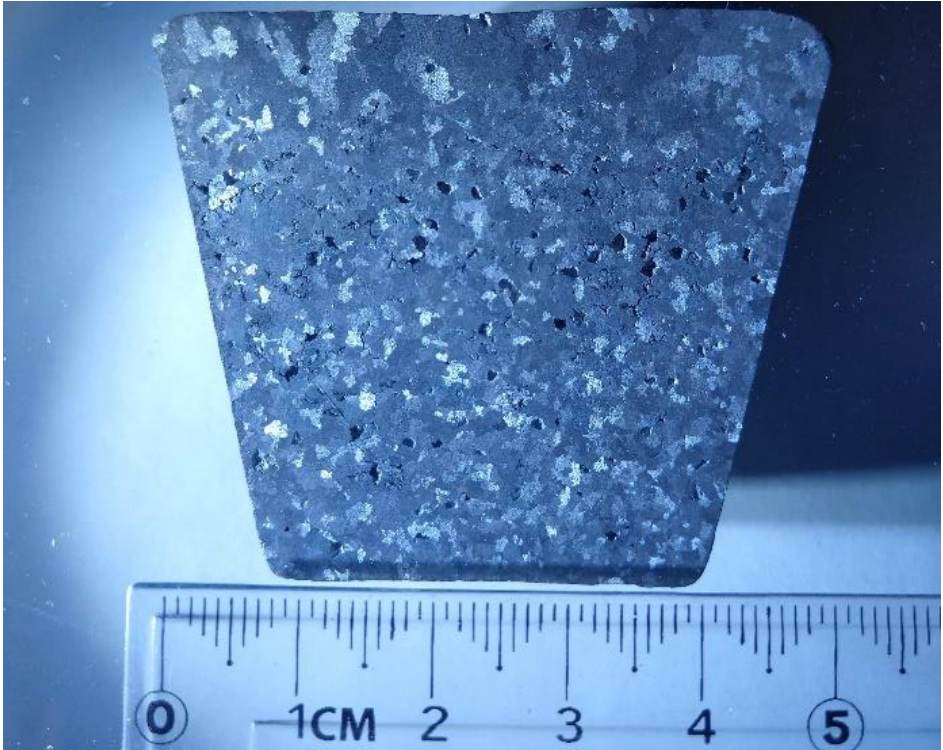


12

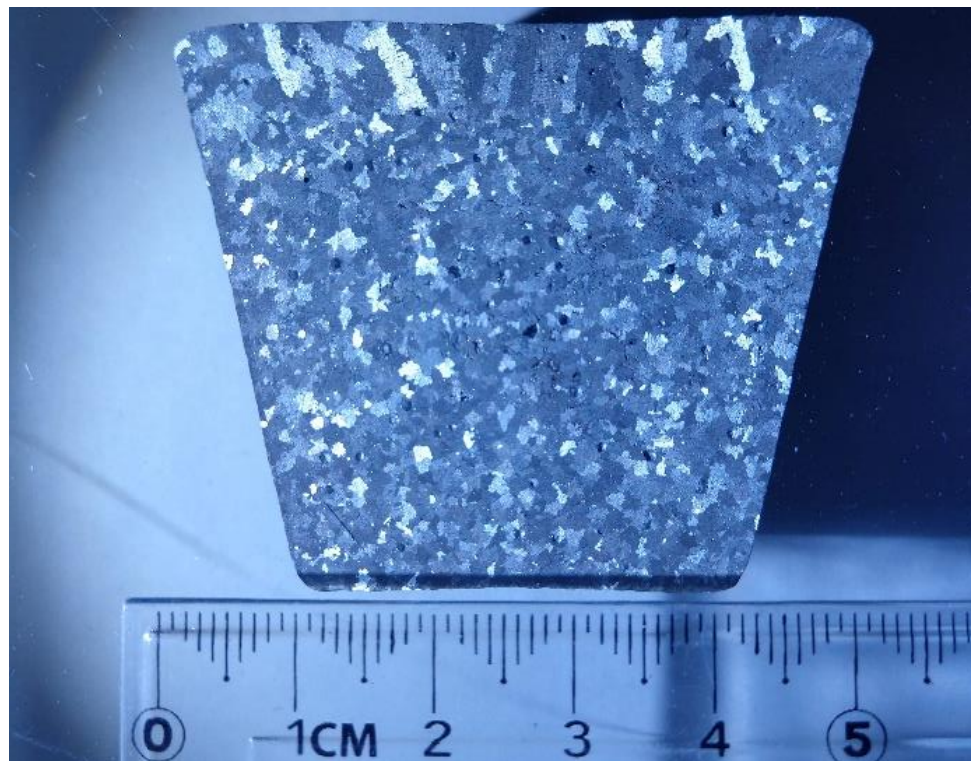


5.7. Análisis tamaño de grano

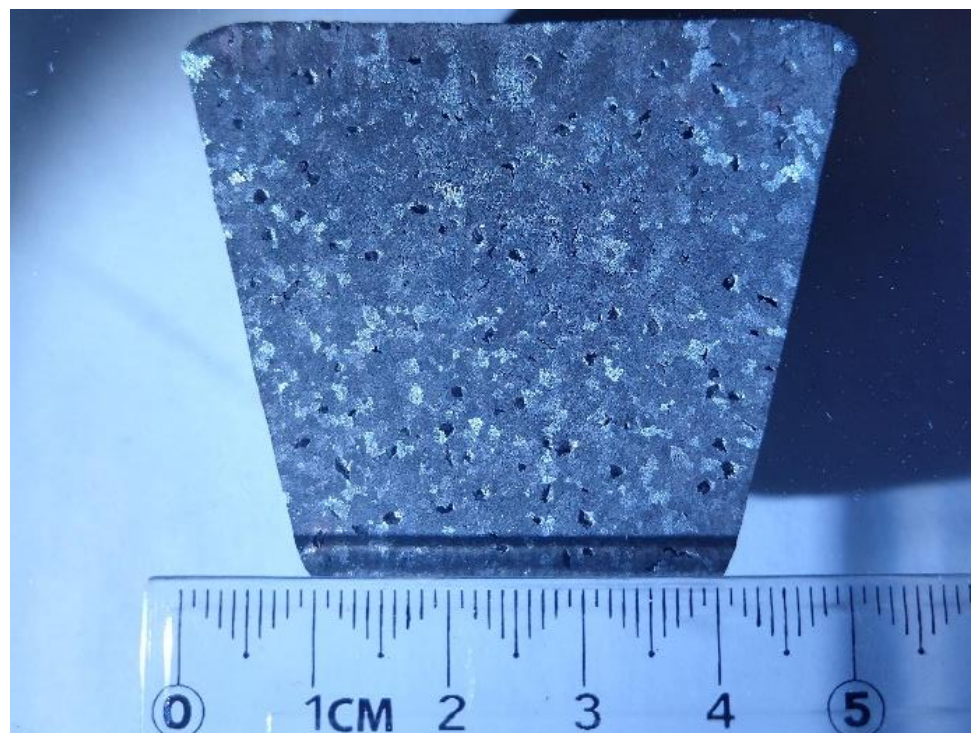
Tabla 7. Crecimiento de granos en la aleación

Probeta	Imagen
1	
2	

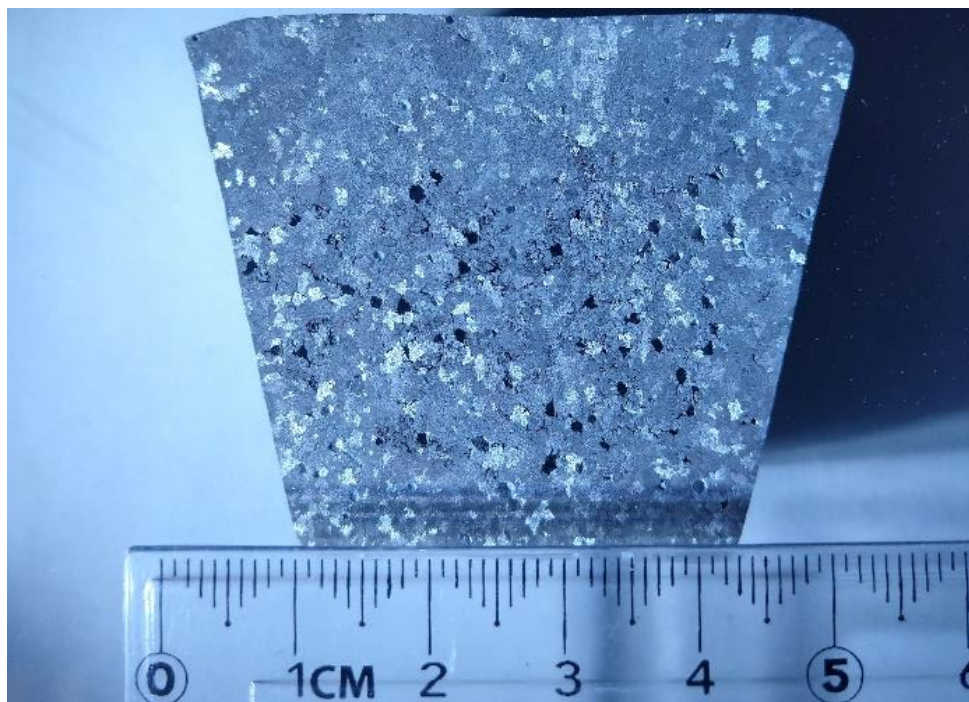
3



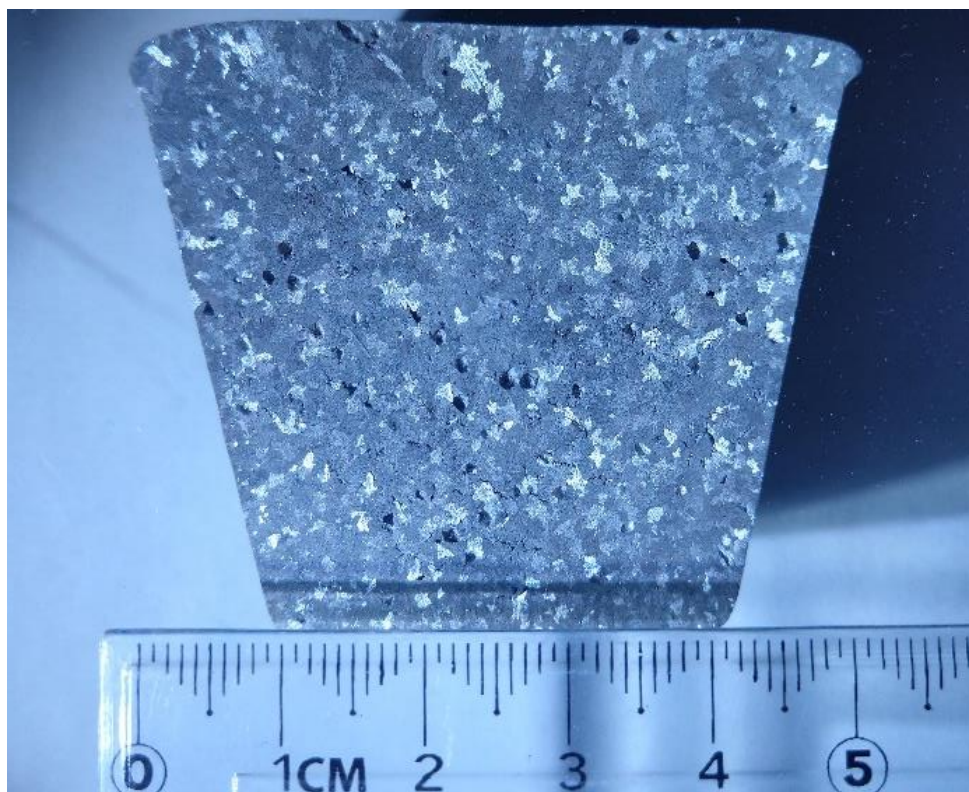
4



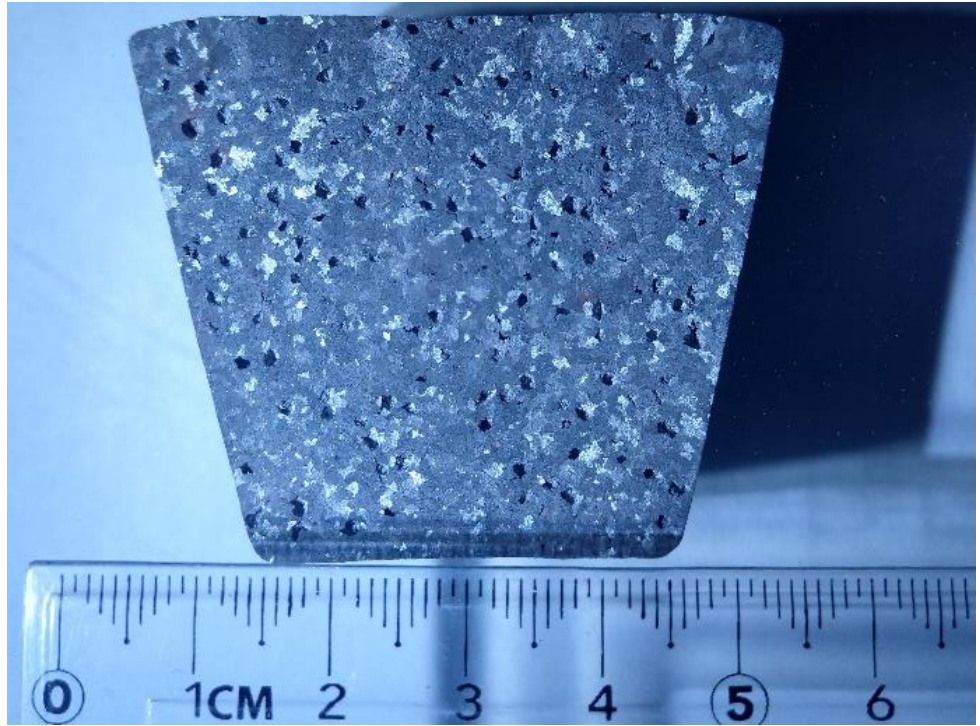
5



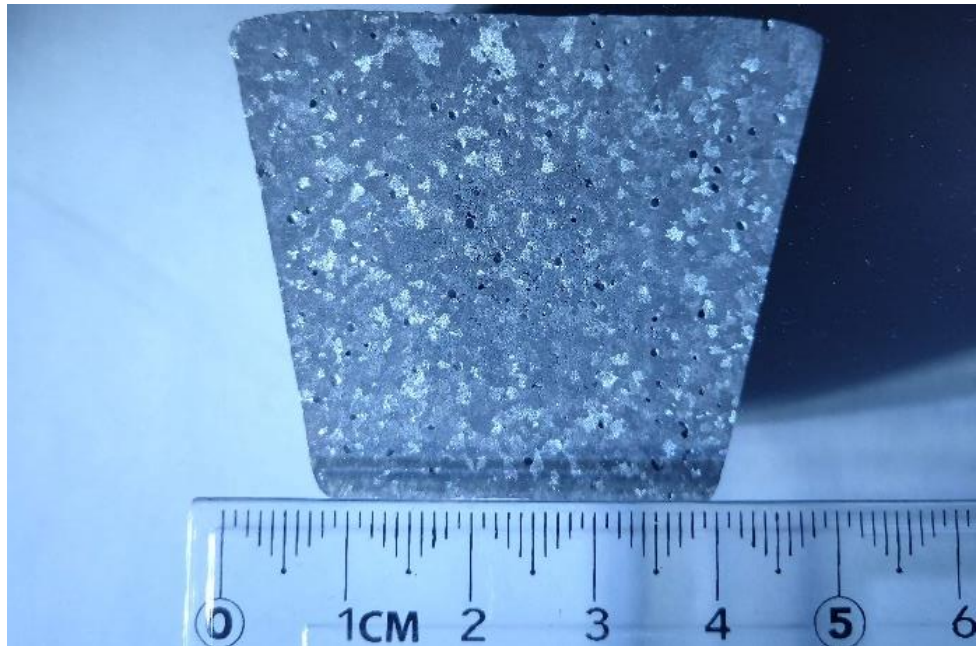
6



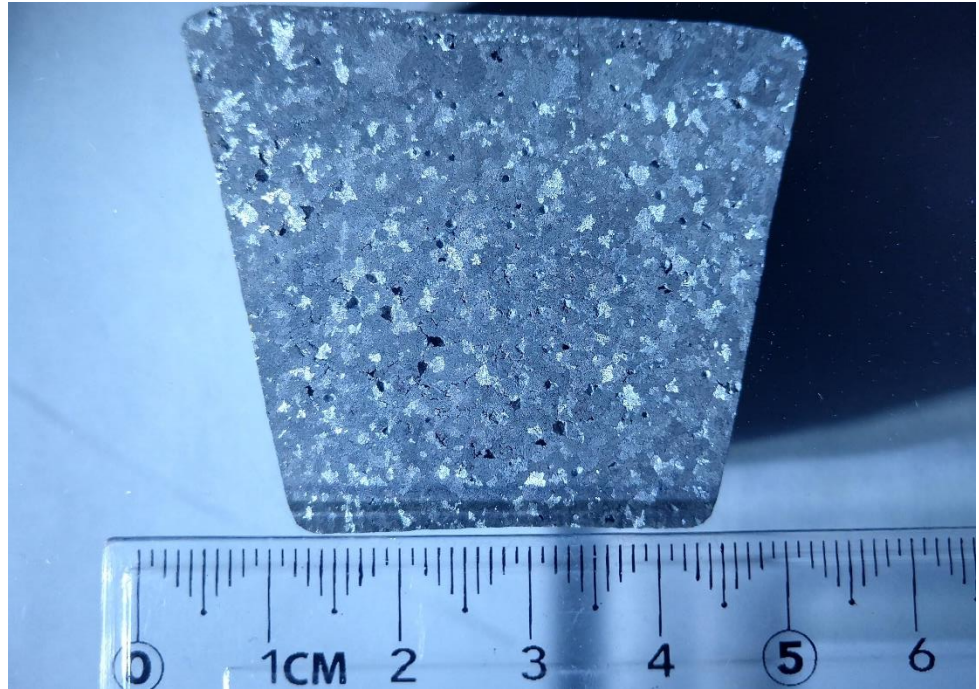
7



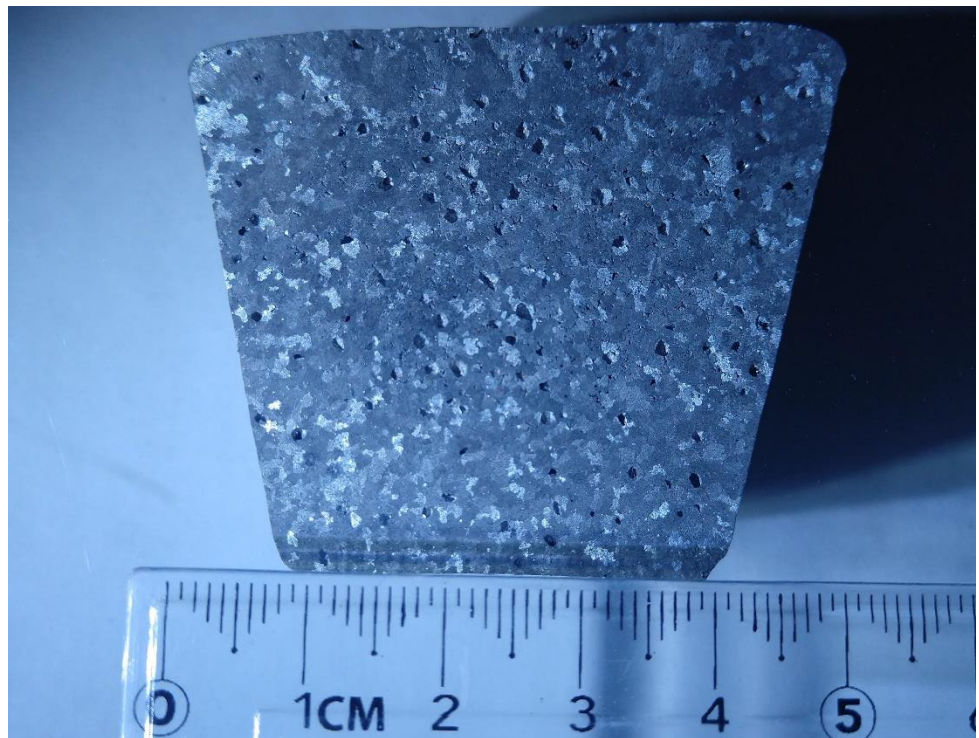
8



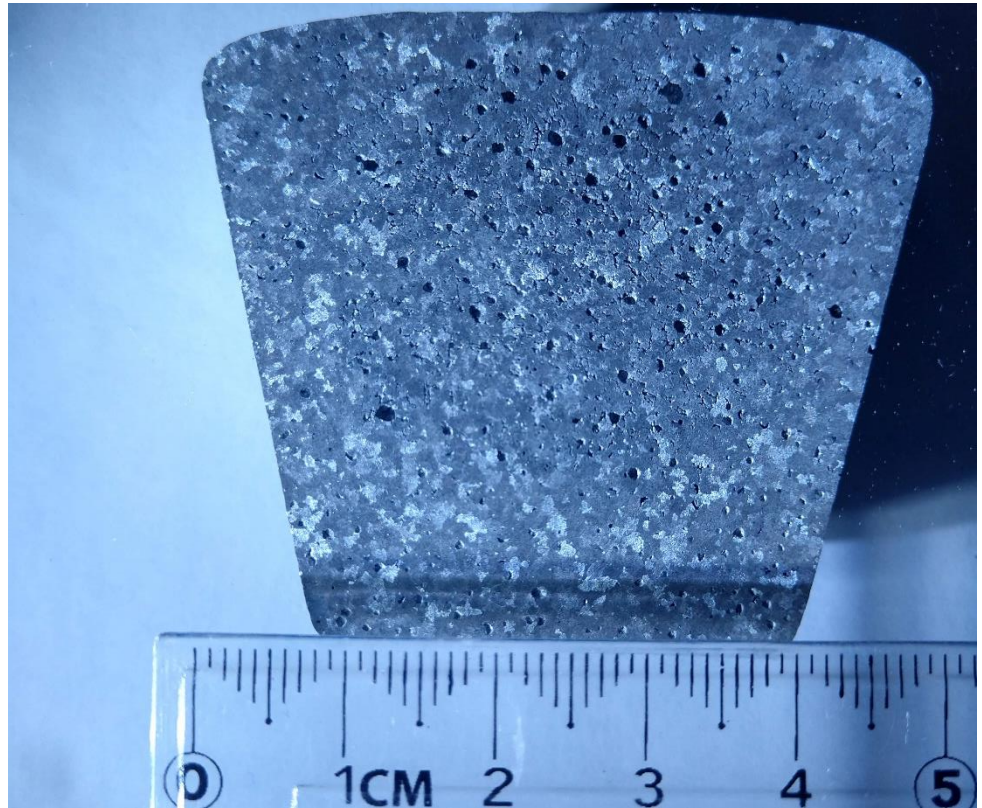
9



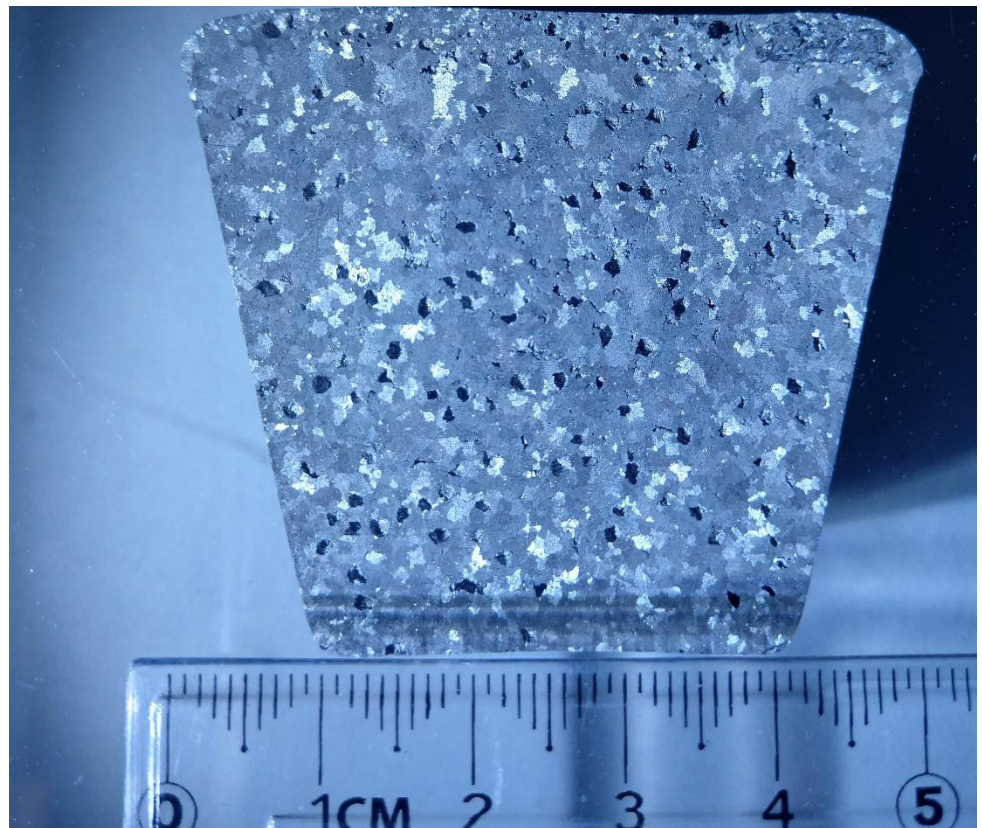
10



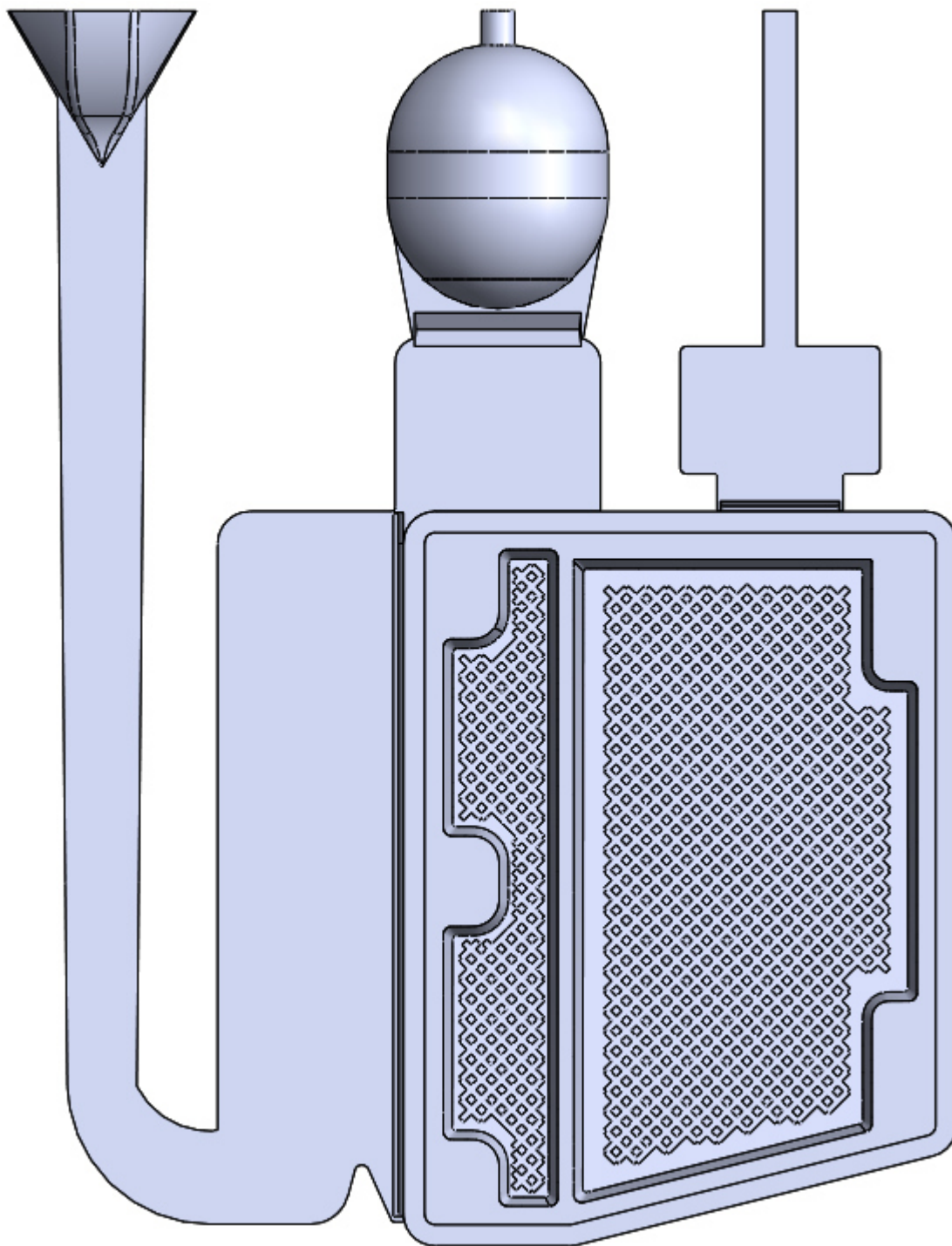
11

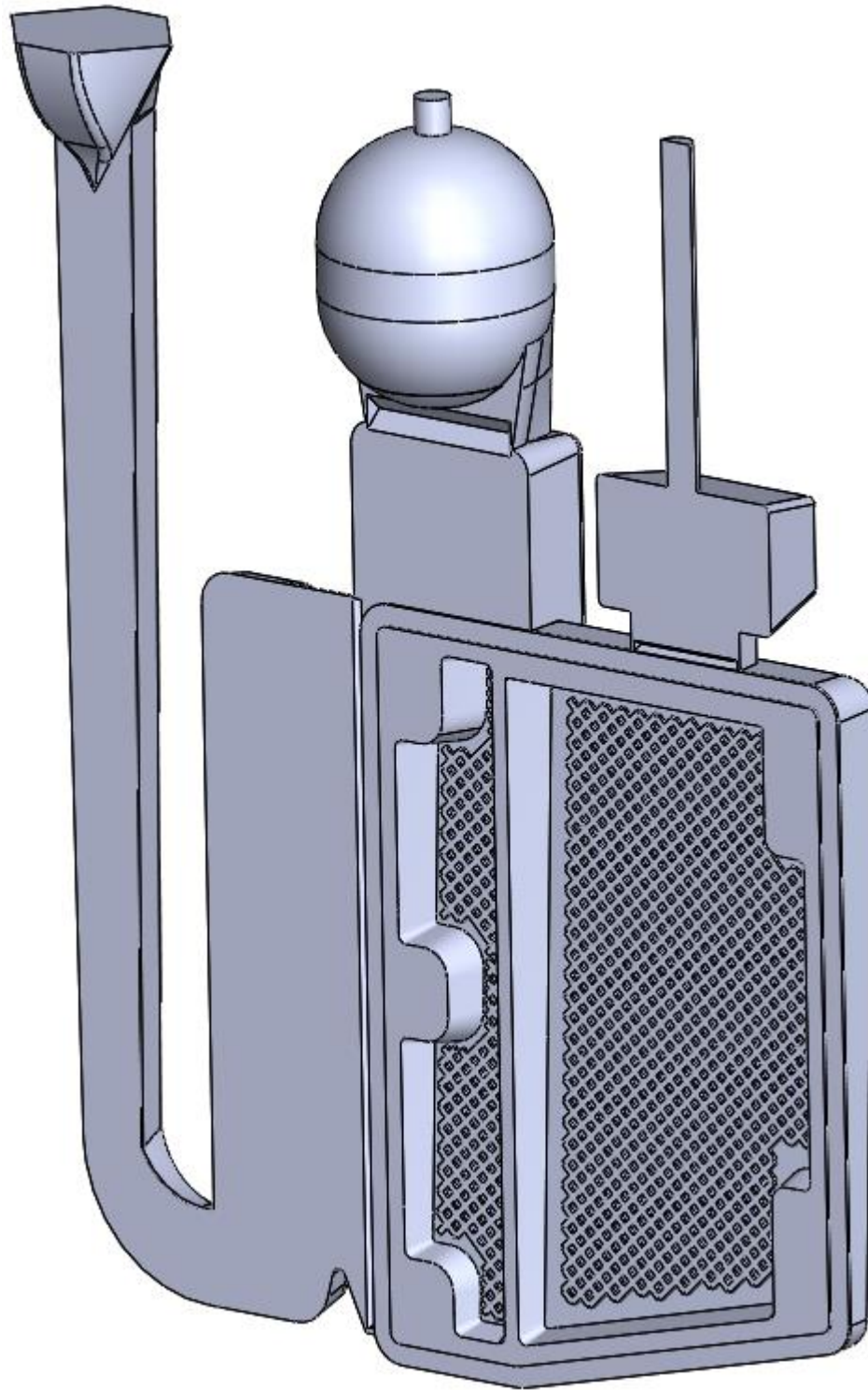


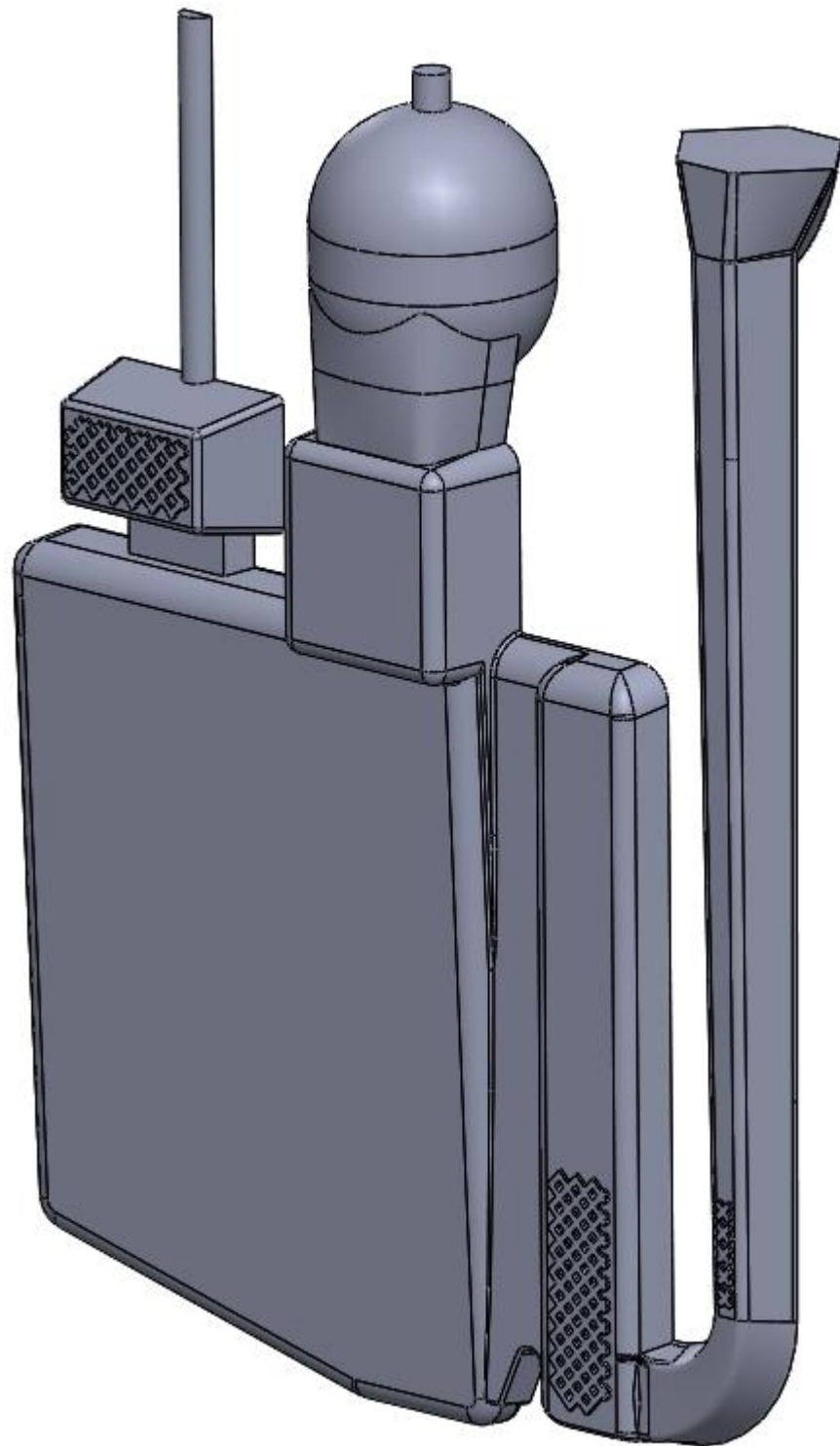
12

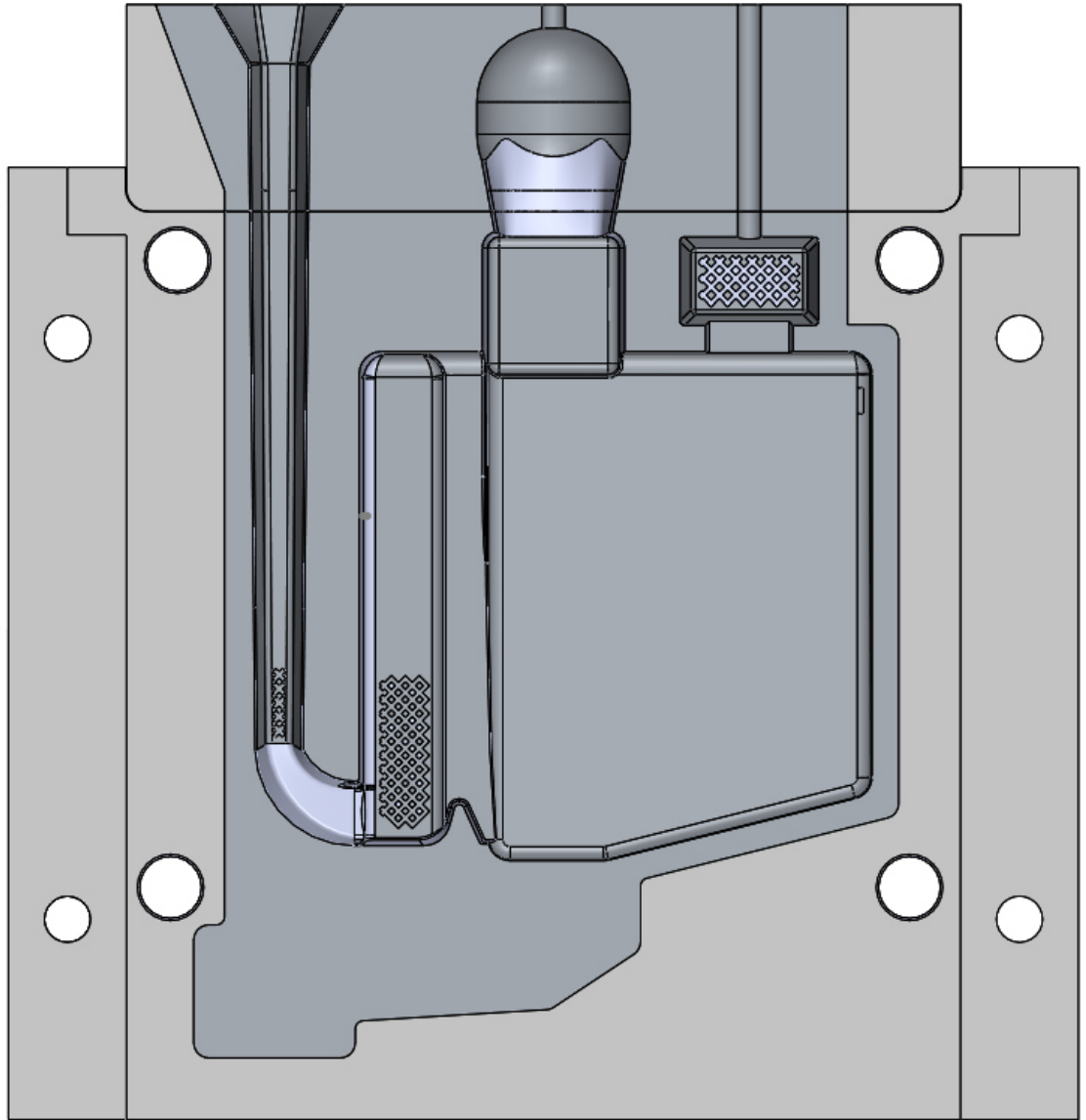


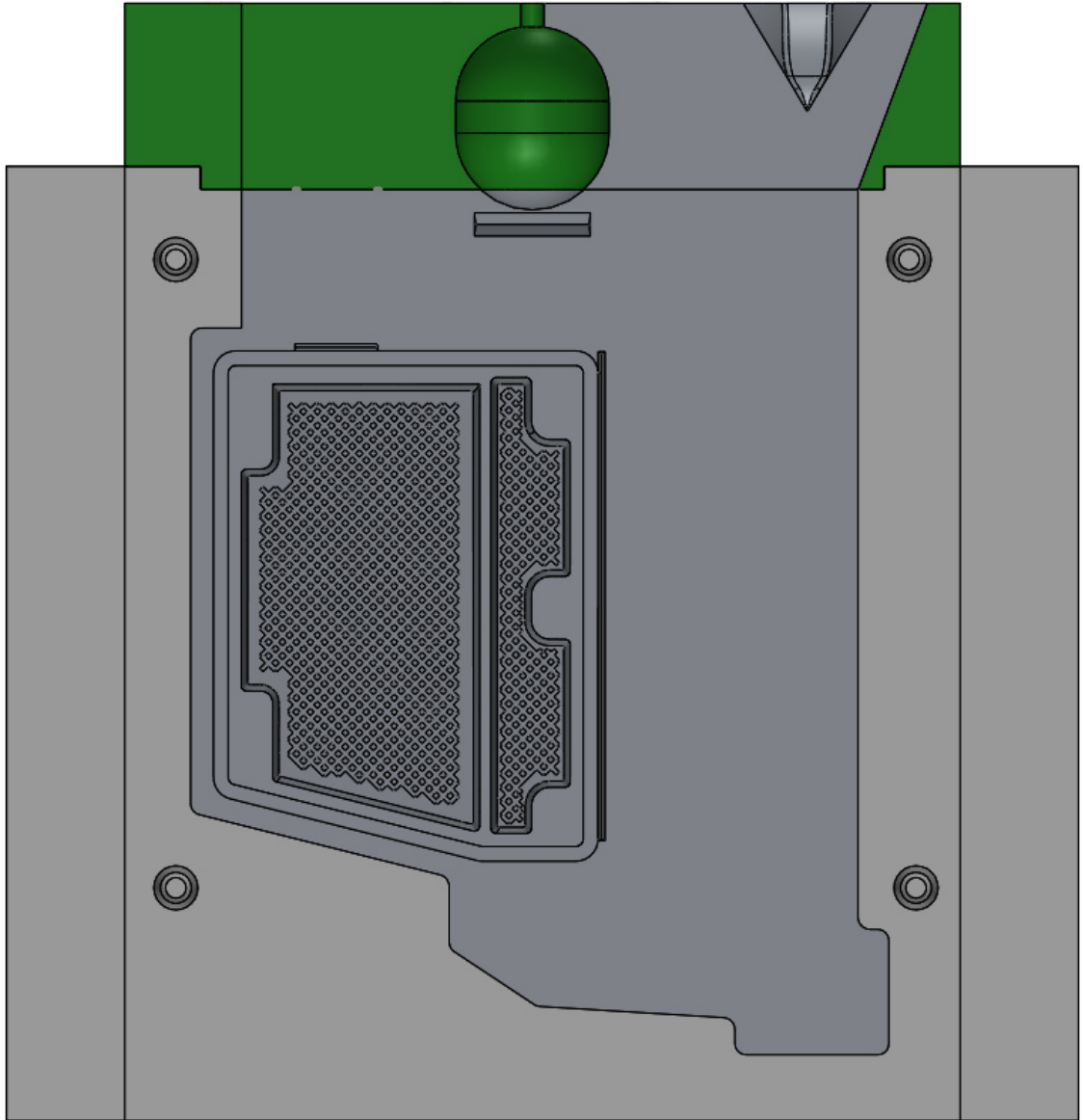
5.8. Análisis del diseño en Solid Works

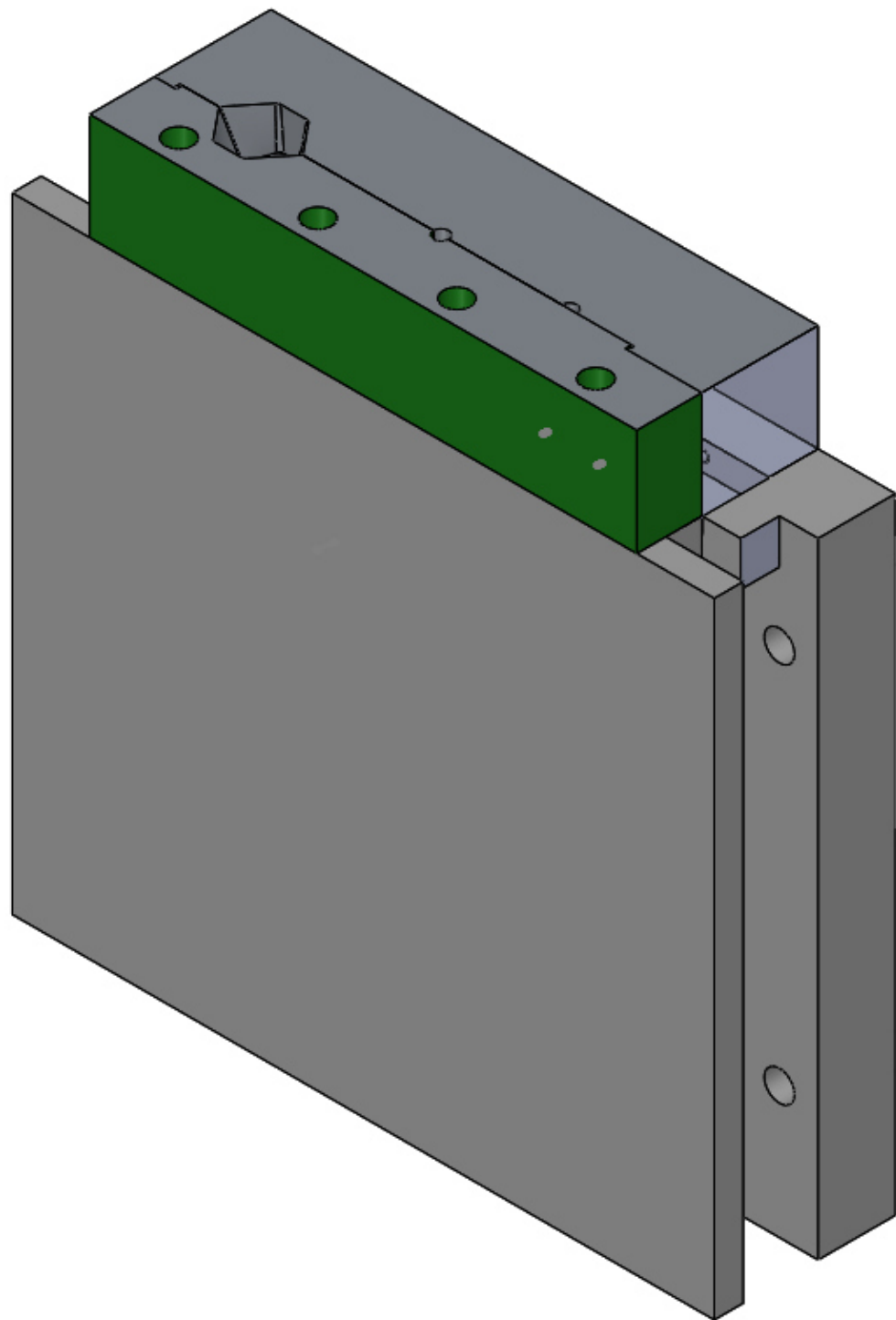




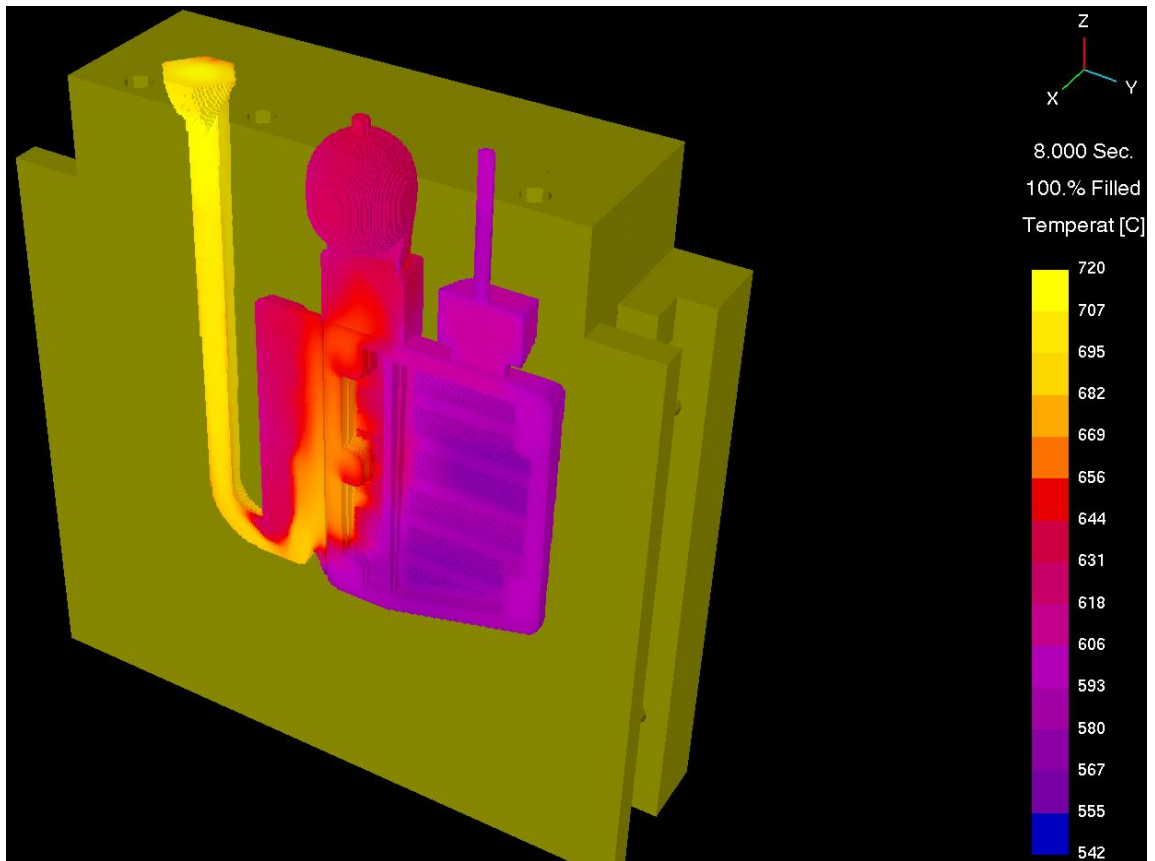




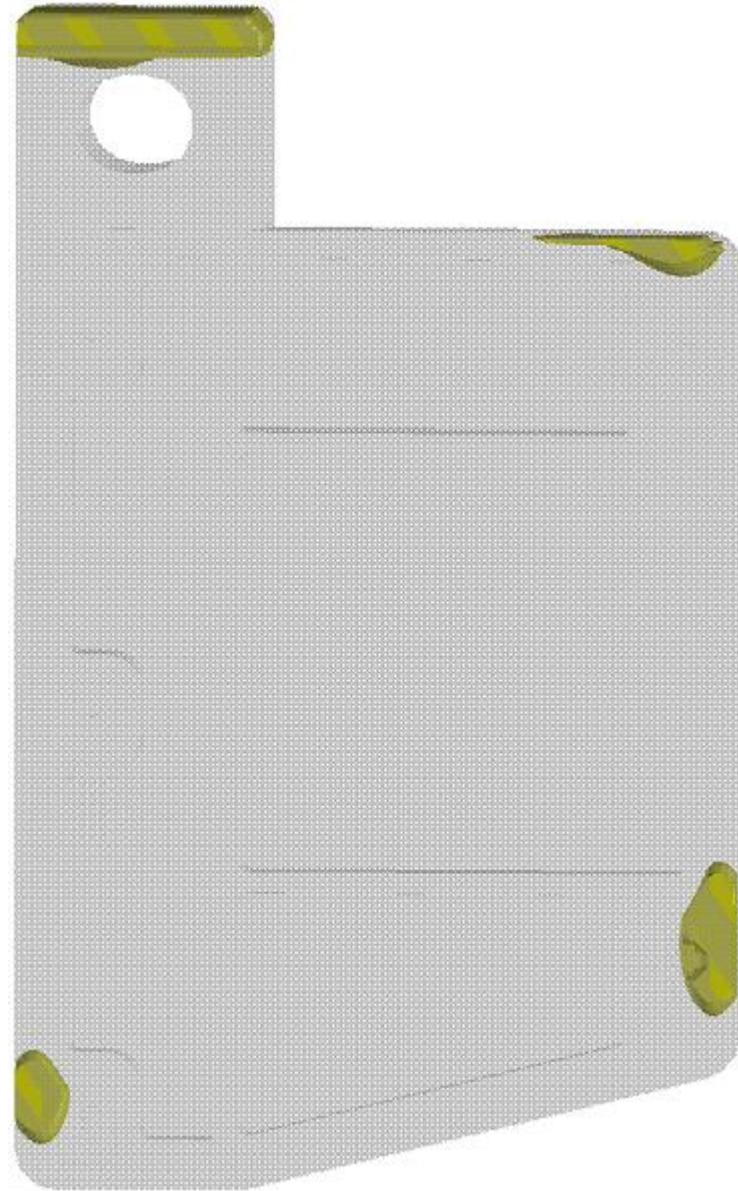




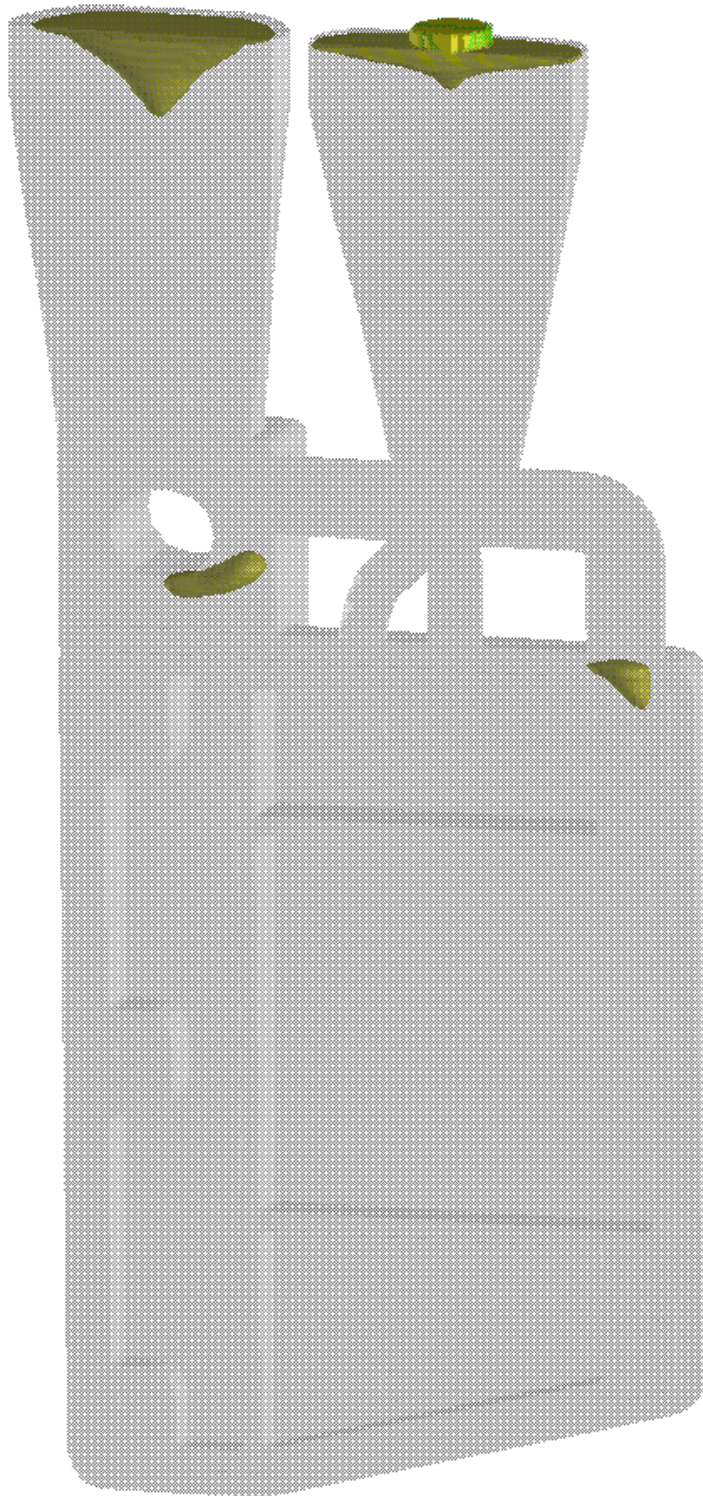
5.9. Análisis de simulación en SolidCast8



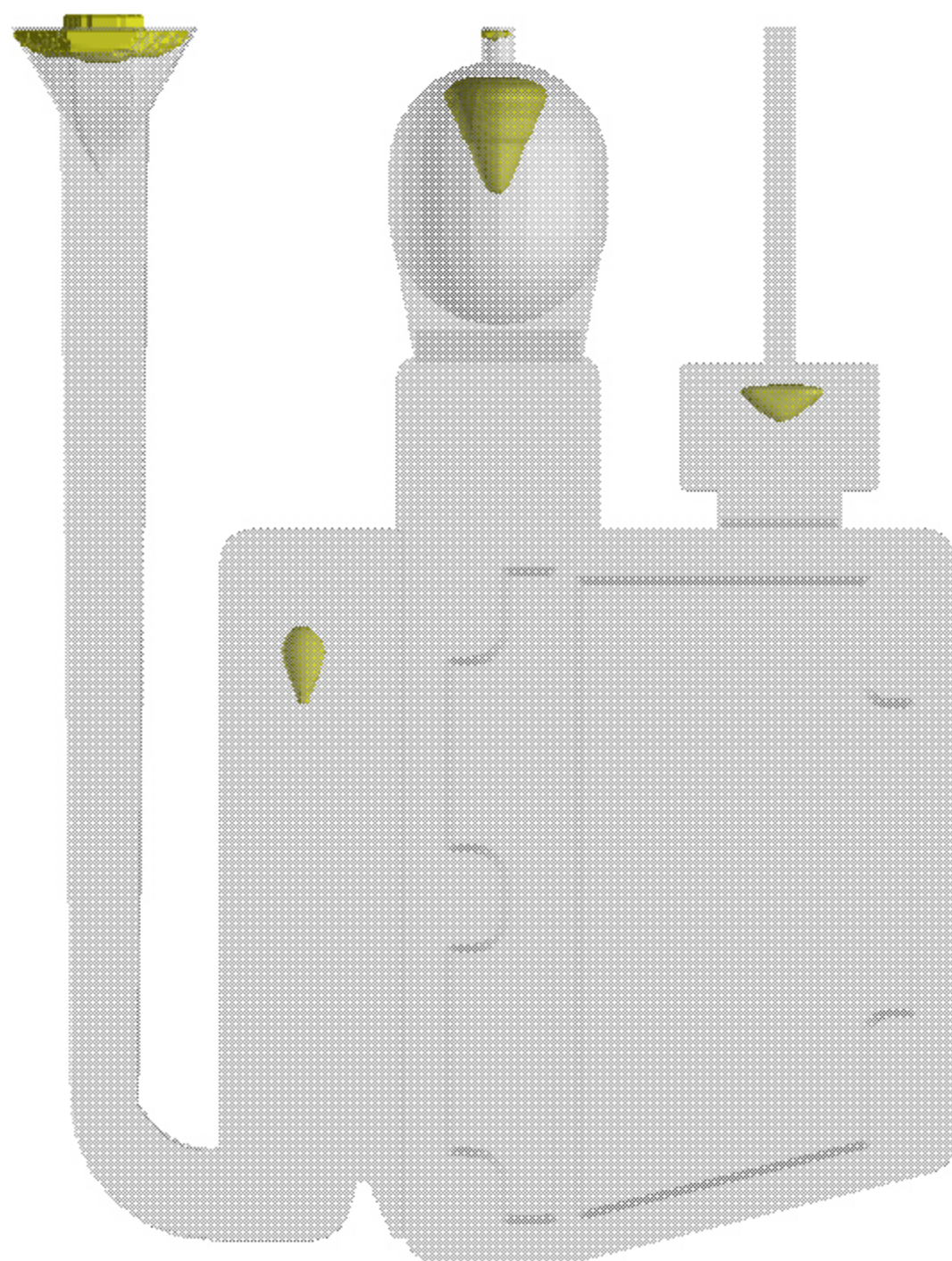
5.9.1. Análisis de simulación burda



5.9.2. Análisis de simulación caso actual



5.9.3. Análisis de simulación caso propuesto



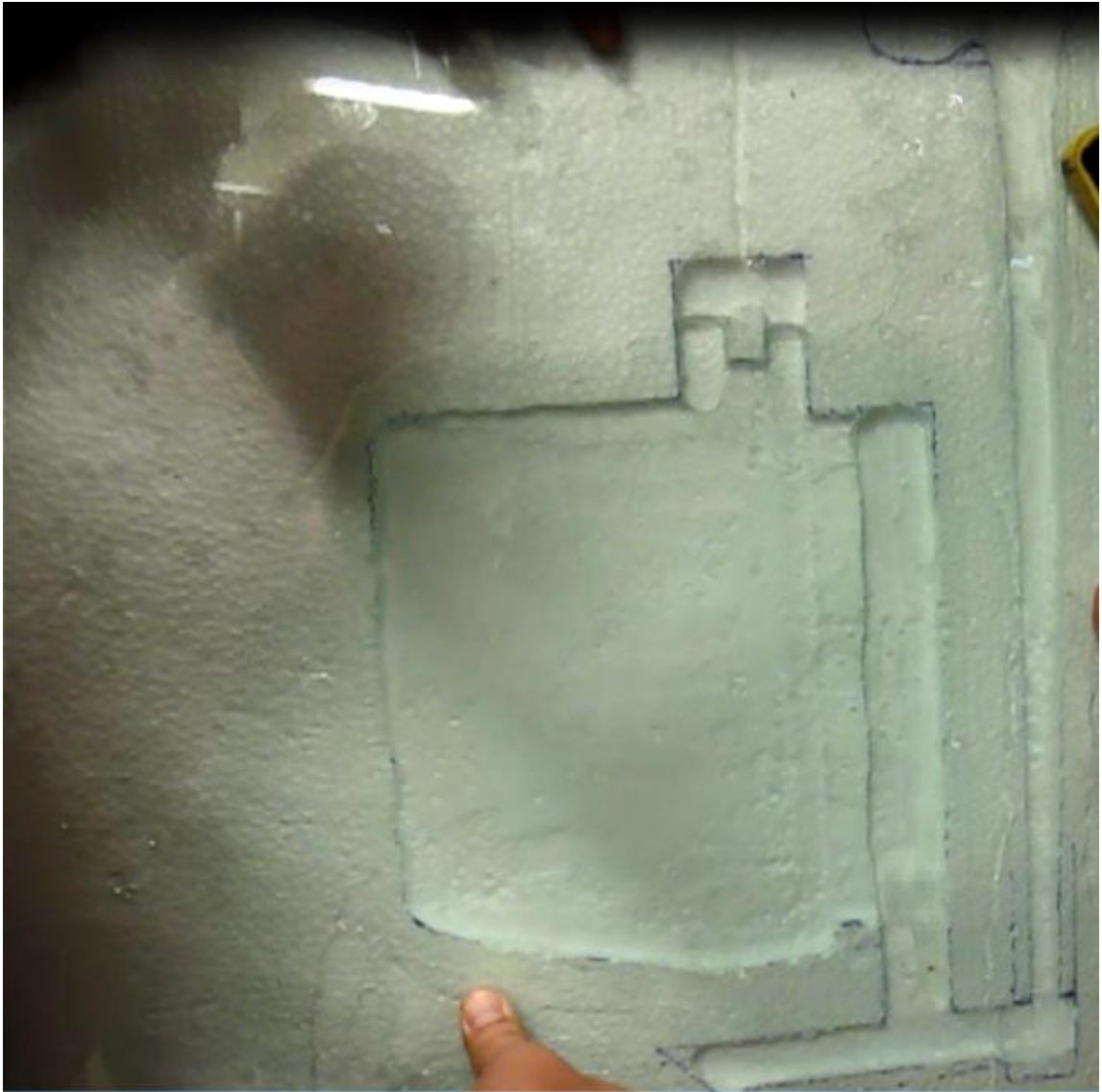
5.10. Análisis del modelo físico











5.11. Molde terminado









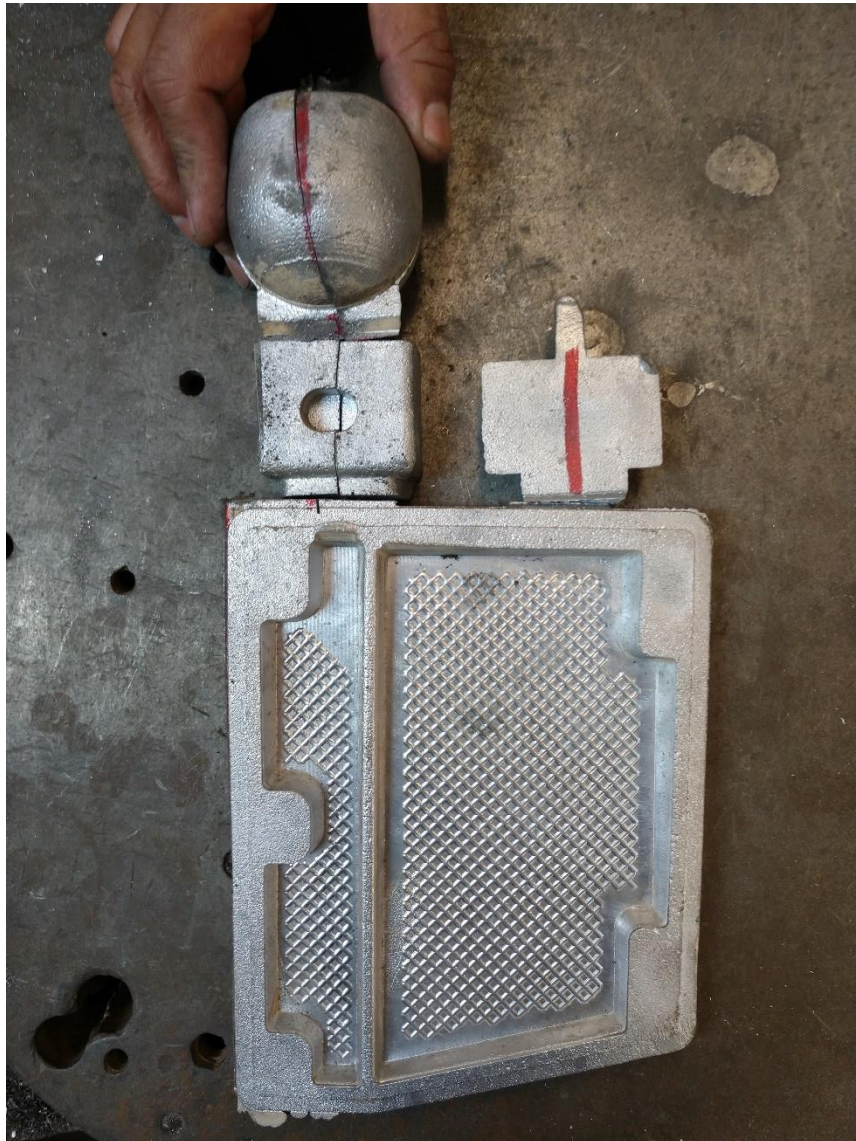


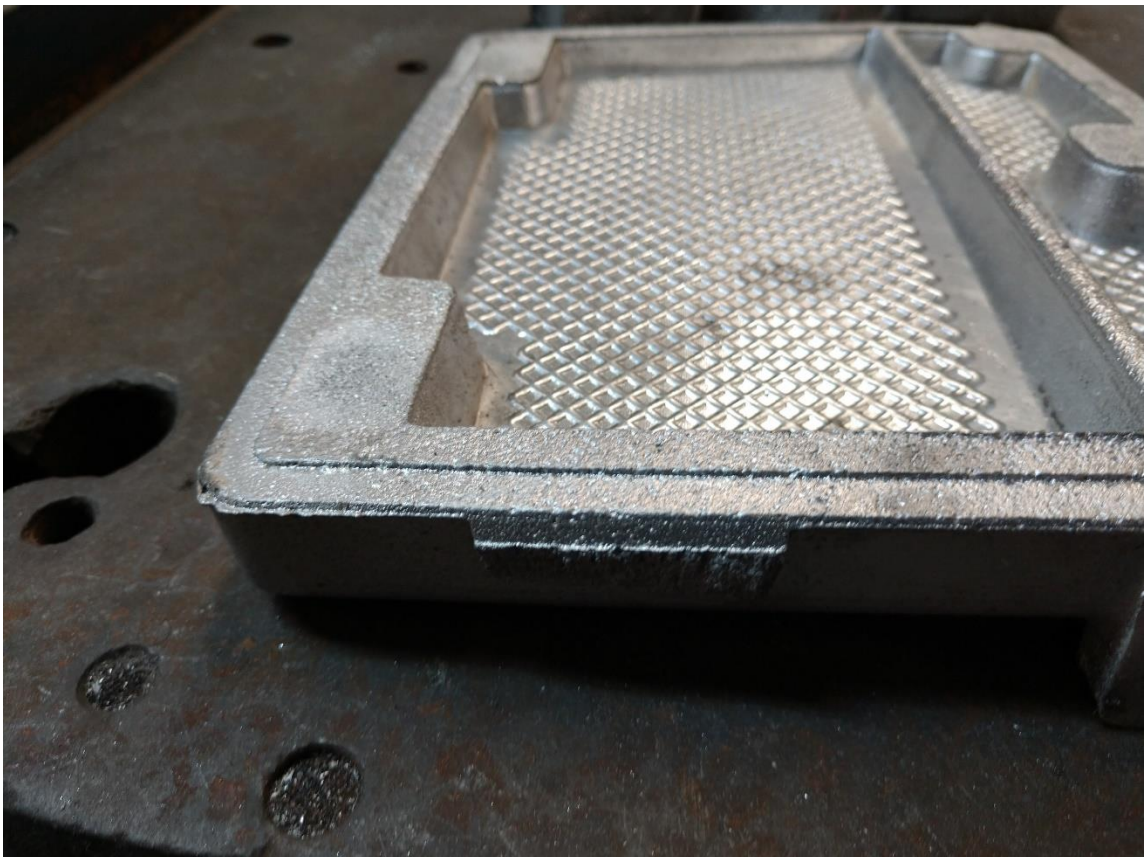
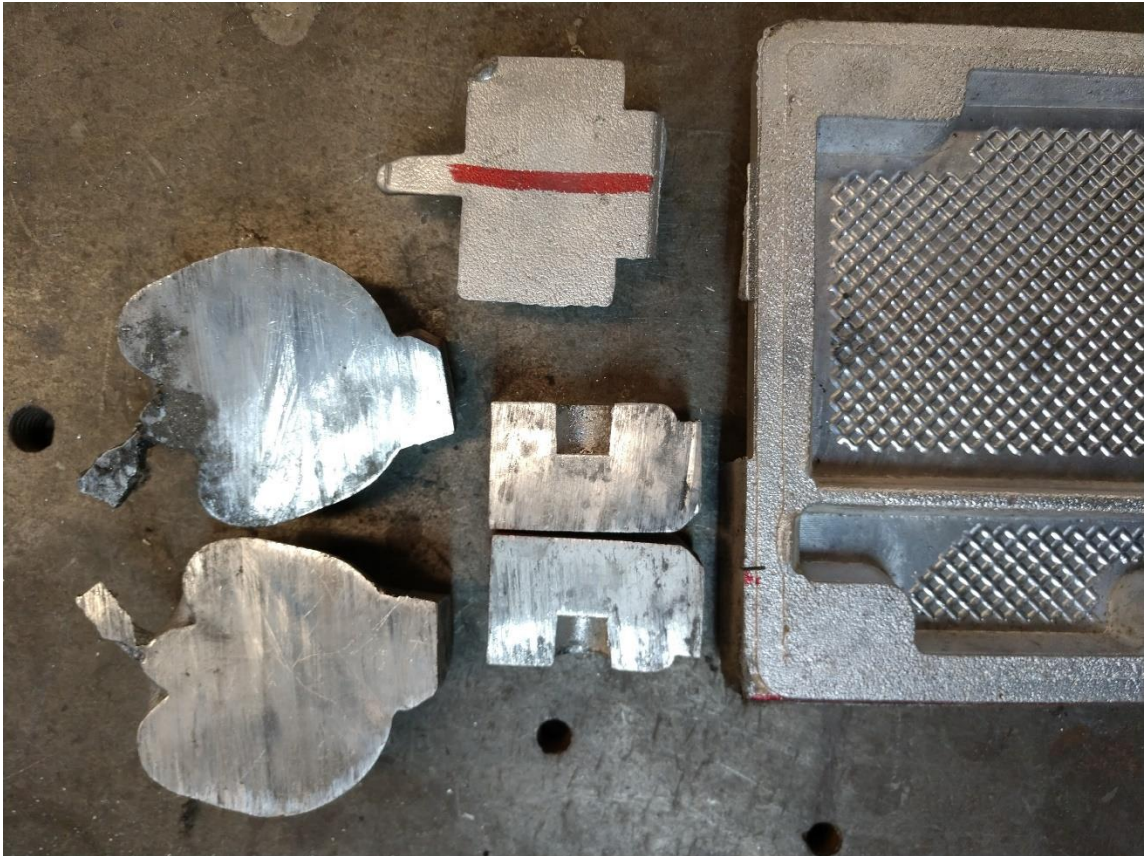
5.12. Análisis de piezas vaciadas



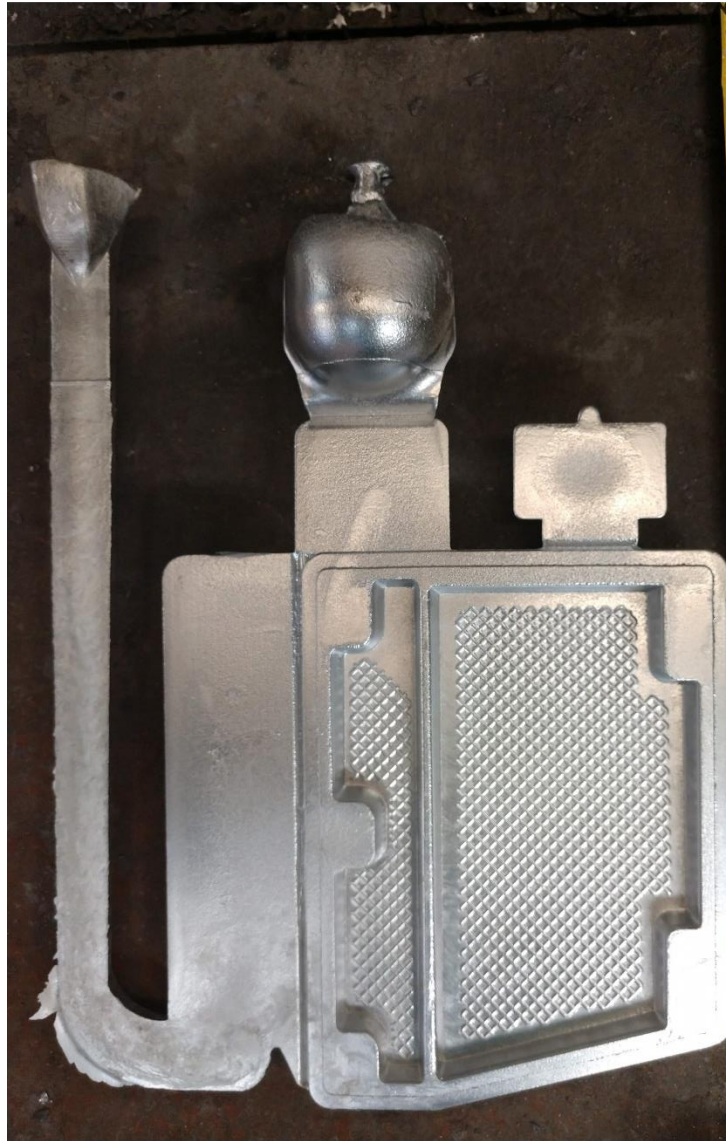














CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

La desgasificación con lanza fija, es el método más simple, pero de baja eficiencia. Las burbujas son grandes, con muy bajo tiempo de permanencia en el aluminio líquido. El tratamiento se recomienda para crisoles pequeños y en general es necesario operar con varias lanzas o mover las mismas para alcanzar todo el volumen de metal.

La desgasificación rotativa podría llevar a cabo la "una eficiencia de desgasificación del 100%" siempre y cuando el rotor genere burbujas más pequeñas de 5 milímetros de diámetro mientras que la burbuja producida por una lanza típicamente produce una eficiencia de desgasificación de 10% a 20%.

Se hizo evidente que la desgasificación rotativa no sólo produce burbujas "finas y pequeñas" sino que lo más importante es que las burbujas se dispersan uniformemente a través de la masa fundida.

Se realizó el análisis del proceso que la empresa maneja y se encontró porosidad por micro contracción del orden de $400\mu\text{m}$ en las piezas analizadas durante el diagnóstico, así mismo la modificación por Sr no presentaba los niveles especificados para obtener estructuras con silicio adecuadas.

La refinación en la aleación presentaba una una baja cantidad de Ti ya que no se refinaba acorde a la norma, la porosidad encontrada fue de aproximadamente 0.78% a través de la prueba Tatur.

Al incrementar las cantidades de TiBAI se muestra un gran cambio en el porcentaje de 0.01% Ti mostrando mejores resultados en la curva de enfriamiento

y refinación de grano, el rango de sub-enfriamiento de 5°C disminuyó a 2°C, el efecto en la prueba Tatur fue muy notable con la cantidad máxima de Ti.

Por otra parte, al aumentar los niveles de Sr proporciona mejoras las microestructuras, al igual que en el Ti, la cantidad máxima de Sr fue de 0.006% Sr, cambiando de un nivel 2 a un nivel 4 según la clasificación de Gruzlesky.

Cuando se combinó la cantidad máxima de Ti y de Sr los resultados fueron de gran importancia, pues al llevar a cabo un análisis en las piezas se logró reducir un 20% la porosidad en la pieza dejando esta combinación como la ideal, aunque los niveles de refinador y modificador siguen siendo bajos, pero por cuestión de costos se pueden manejar estos niveles.

Los diseños a través del software SolidCast arrojaron excelentes resultados, se recomendó cambiar a molde permanente con un nuevo diseño para fabricar un producto de mejor calidad evitando que aparezca porosidad en la parte de contacto de la pieza con los alimentos.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

Hacer un estudio profundo de costo beneficio para evaluar si incrementos mayores de TiBAI y Sr son factibles a como se estableció en este trabajo.

Trabajar en cursos técnicos con gente de planta ya que hay mucho desconocimiento del efecto de las variables de proceso sobre la sanidad del casting.

Optimizar aún más el sistema de alimentación y eyección de la pieza para incrementar la productividad de la empresa.

Con el conocimiento adquirido durante el proyecto y los resultados obtenidos en la simulación, se recomienda trabajar con molde permanente y obtener condiciones óptimas de proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American National Standard/NSF International Standard for Food Equipment, «Food Equipment Materials,» 1997.
- [2] Torrey soluciones integrales de alta calidad, Lista de refacciones Modelo R-300, Apodaca, Nuevo León, 2018.
- [3] Torrey soluciones integrales de alta calidad, Especificaciones tecnicas Rebanadora R-300, Apodaca, Nuevo León, 2018.
- [4] J. Ayala Cázares, «Estudio de la formación de porosidad en una aleación de aluminio 356,» UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN, San Nicolas de los Garza, Nuevo León, 2014.
- [5] L. Scrucca, An R package for quality control charting and statistical process control.
- [6] Bruker, Product manual Q4 TASMAN, 2016.
- [7] E. Nagel, Modelos de explicación científica, La estructura de la ciencia, Barcelona: Paidós, 2006, pp. 35 - 50.
- [8] C. E. Rivas, M. A. Pineda, J. E. Agüello y G. A. Mejia, Pruebas de densidad en vacío en muestras de aluminio obtenido a partir de latas para bebidas carbonatadas.
- [9] A. Forcato, Tratamiento del metal líquido, Tecnologías de fundición, 2016.
- [10] L. Parmenter, D. Apelian y F. Jensen, Development of a statistically optimized test method for the reduced pressure test.

- [11] W. D. Callister, Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Barcelona: Reverté.
- [12] J. F. Shackelford, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, 6ta ed., Madrid: Pearson, 2005.
- [13] C. G. Gaya, Técnicas de mejora de la calidad, UNED , 2000.

- [14] A.M. Samuel y F. H. Samuel, Modification of Iron intermetallic by Magnesium and Strontium in Al-Si Alloys, International Journal of Cast Metals Research Volume 10, 1997.
- [15] Alexey Sverdlin, Introduction to Aluminum, George E. Totten y D. Scott Mackenzie, Handbook of Aluminum, Volume, Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker, Inc.
- [16] Sidney H. Avner, Introduction to Physical Metallurgy, McGraw-Hill, 1964.
- [17] Jhon D. Verhoeven, Fundamentals of Physical Metallurgy, Jhon Wiley & Sons, Inc. 1987.
- [18] L. Bäckerud, E. Król y J. Tamminen, Solidification Characteristics of Aluminum Alloys Volume 1, SKANALUMINUM, Suiza 1986.
- [19] K. Jackson, Solidification ASM, Metals Park, Ohio, 97.
- [20] R. E. Reed-Hill, Physical Metallurgy Principles, Van Nostrand Company 97.
- [21] M. C. Flemings, Solidification Processing, McGraw-Hill 1974
- [22] L. Bäckerud, G. Chai y J. Tamminen, Solidification Characteristics of Aluminium Alloys, volume 1, Foundry Alloys AFS/skanaluminium, E.U.A. 990.
- [23] M. Otte, S. McDonald, J. Taylor, D. Stjohn, W. Schneider, Controlling Porosity- Related Casting Rejects: Understanding the Role of Iron in Aluminium-Silicon Alloys CASTEXPO AFS, St. Louis Missouri U.S.A. 999.

- [24] G. Gustafsson, T. Thorvaldsson, y G. L. Dunlop, The influence of Fe and Cr on the Microstructure of Cast Al-Si-Mg Alloys, Metallurgical Transactions A, Volume 7 A, 1986.

FIGURAS

Figura 1. Porta plancha R-300 de aluminio sin anodizar [2].	15
Figura 2 Rebanadora R-300 donde se utiliza la pieza en estudio, °Solida construcción en aluminio anodizado para carnes rojas sin hueso, a) vista frontal, b) vista trasera [3].	16
Figura 3	22
Figura 4 Molde actual de la porta plancha montado en el área de trabajo.	34
Figura 5. Interior del molde porta plancha, parte A y B respectivamente.	35
Figura 6. Pareto de defectos encontrados en la porta plancha R-300 R-300	36
Figura 7. Mapa de flujo de valor para la elaboración de la porta plancha R-300.	37
Figura 8. Diagrama de Ishikawa	38
Figura 9. Obtención de la probeta de aluminio vertiendo aluminio líquido a 710°C en un recipiente cerámico	39
Figura 10. Probeta para análisis de composición química pulida con lija 120	39
Figura 11. Espectrómetro de chispa Bruker destinado al análisis de metales	40
Figura 12. Momento justo durante de la realización de la prueba por arco eléctrico	41
Figura 13. Probetas Tatur para estudio de porosidad, microporosidad y análisis de contracción	42

Figura 14. Medición del peso de agua desplazada por el casting	43
Figura 15. Zonas de porosidad y distribución de contracción ocurrida una vez solidificada la aleación	44
Figura 16. Lanza de grafito usada para inyectar gas nitrógeno.....	46
Figura 17. Desgasificado mediante el uso de lanza de grafito	47
Figura 18. Desgasificador rotativo	47
Figura 19. Presión de nitrógeno utilizado durante la desgasificación	48
Figura 20. Rotor en funcionamiento, desgasificando 600kg de aluminio líquido	48
Figura 21. Retirar escoria de la superficie del aluminio líquido	49
Figura 22. Recipiente de acero inoxidable usado para obtener las probetas para la prueba de presión reducida	50
Figura 23. Extracción de probeta para la prueba de calidad de presión reducida	50
Figura 24. Probeta de aluminio sobre la base de la cámara de vacío.	51
Figura 25. Indicador de presión de vacío con 25 pulgadas de mercurio	51
Figura 26. Inicio y termino de la prueba por medio de válvula de flujo...	52
Figura 27. Probeta retirada del recipiente de acero inoxidable	52
Figura 28. Cortando probeta en cierra cinta vertical.....	53
Figura 29. Probeta pulida y abrillantada lista para inspección visual	53
Figura 30. Estudio de 12 probetas para el estudio de densidad de hidrogeno.....	54
Figura 31. Método de Arquímedes para conocer la densidad	54
Figura 32. Probeta cortada para análisis de porosidad	55
Figura 33. Las 12 probetas dónde se analizó la porosidad	55
Figura 34. Pulido de probetas con distintas lijas	56
Figura 35. Microscopio óptico de 50X hasta 400.....	56
Figura 36. Peso del CuSO_4 lado izquierdo y peso del agua lado derecho	58
Figura 37. Solución de ataque, CuSO_4	58
Figura 38. Solución de limpieza, HNO_3 y HF	59

Figura 39. Atacando probeta en solución de CuSO_4	59
Figura 40	60
Figura 41. Enjuagando probeta en solución de limpieza	60
Figura 42. Enjuagando probeta después de solución de limpieza	61
Figura 43. Probeta con macro estructura revelada	61
Figura 44. Vista frontal porta plancha 300.....	62
Figura 45. Vista en proyección isométrica de porta plancha 300	63
Figura 46. Diseño del sistema de alimentación del caso actual	64
Figura 47. Diseño del sistema de alimentación del caso actual, vista isométrica	65
Figura 48. Propuesta diseño de sistema de alimentación 1A.....	66
Figura 49. Propuesta diseño de sistema de alimentación 1B.....	67
Figura 50. Exportar con extensión STL desde Solid Works	68
Figura 51. Elaboración de modelo físico	98
Figura 52. Modelo físico terminado	98
Figura 53. Molde actual	102
Figura 54. Molde propuesto.....	103
Figura 55. Pieza obtenida con molde actual dónde se aprecian defectos	104
Figura 56. Pobre distribución de burbujas con lanza.....	108
Figura 57. Excelente distribución de burbujas con rotor.....	109
Figura 58. Guía de comparación para evaluar las probetas seccionadas	110
Figura 59. Prueba 1, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor	111
Figura 60. Prueba 2, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor	112
Figura 61. Prueba 3, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor	112
Figura 62 . Prueba 4, A) desgasificado con lanza y B) desgasificado con rotor	112

Figura 63. Metalografía mostrando micro porosidad por gas a 40X en microscopio óptico	121
Figura 64. Metalografía mostrando micro contracción a 40X en microscopio óptico	122
Figura 65. Defectos a 200X en microscopio electrónico de barrido	123

TABLAS

Tabla 3.1	22
Tabla 2. Matriz de causa y efecto.....	38
Tabla 3. Porcentaje de los elementos presentes en la aleación.....	106
Tabla 4. Composición química de aluminio A356.....	106
Tabla 5 Resultados de las pruebas de presión reducida de acuerdo a la comparación con el estándar	113
Tabla 6. Macro porosidad en las probetas de estudio	124
Tabla 7. Crecimiento de granos en la aleación	130

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American National Standard/NSF International Standard for Food Equipment, «Food Equipment Materials,» 1997.
- [2] Torrey soluciones integrales de alta calidad, Lista de refacciones Modelo R-300, Apodaca, Nuevo León, 2018.
- [3] Torrey soluciones integrales de alta calidad, Especificaciones tecnicas Rebanadora R-300, Apodaca, Nuevo León, 2018.
- [4] J. Ayala Cázares, «Estudio de la formación de porosidad en una aleación de aluminio 356,» UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN, San Nicolas de los Garza, Nuevo León, 2014.
- [5] L. Scrucca, An R package for quality control charting and statistical process control.
- [6] Bruker, Product manual Q4 TASMAN, 2016.
- [7] E. Nagel, Modelos de explicación científica, La estructura de la ciencia, Barcelona: Paidós, 2006, pp. 35 - 50.
- [8] C. E. Rivas, M. A. Pineda, J. E. Agüello y G. A. Mejia, Pruebas de densidad en vacío en muestras de aluminio obtenido a partir de latas para bebidas carbonatadas.
- [9] A. Forcato, Tratamiento del metal líquido, Tecnologías de fundición, 2016.
- [10] L. Parmenter, D. Apelian y F. Jensen, Development of a statistically optimized test method for the reduced pressure test.

- [11] W. D. Callister, Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Barcelona: Reverté.
- [12] J. F. Shackelford, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, 6ta ed., Madrid: Pearson, 2005.
- [13] C. G. Gaya, Técnicas de mejora de la calidad, UNED , 2000.